



ПРАКТИКУМ ПО ОПТИКЕ IV

1983

~~X~~
A-26830
ТАРТУСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРАКТИКУМ ПО ОПТИКЕ IV

ТАРТУ 1983

Составитель Хенн Воодайд

**Утверждено на заседании совета физико-химического
факультета ТГУ 23 ноября 1983 года**

ABSTRACTED

Институт химии
и физики
ТГУ

448546

Введение

Настоящий сборник руководств к лабораторным работам по оптике предусмотрен для пользования студентами второго курса физического отделения. В случае рекомендации его для студентов нефизических отделений /химического, математического/ задания в работах могут быть сокращены и упрощены по усмотрению руководителя практикума.

При составлении сборника были использованы аналогичные сборники, составленные доцентом А. Паз^{*} и проф. Л.Л. Голдиным^{xx}, монографии и учебники вузов, которые представлены в списках литературы, предлагаемых в конце каждого руководства.

Некоторые руководства значительно переработаны /4 и 5 работы - П. Парисом, 2 и 6 работы - Х.Воолайдом и Г. Березенковой. Автором работы № 1 является Х. Воолайд.

Руководства к работам составлены так, что дадут лишь необходимый минимум знаний студенту, приступающему к выполнению работы. Для более глубокого изучения темы лабораторной работы необходимо использовать литературу, перечень которой приведен в конце каждого руководства.

Х. Воолайд

^{*}Optika praktikum, tööjuhendid, koost. A.Pae. TRÜ, reprints, Tartu, 1971.

^{xx}Руководство к лабораторным занятиям по физике./ Под ред. Л.Л. Голдина - М.: Наука, 1973.

Содержание

Введение	3
1. Калибровка оптических измерительных приборов	5
2. Определение фокусного расстояния линзы и кардиналь- ных элементов оптической системы	19
3. Моделирование оптических приборов и определение их увеличения	28
4. Определение увеличения, поля зрения и разрешающей способности зрительной трубы	37
5. Сравнение сил света источников с помощью фотометра и градуировка люксметра	47
6. Исследование спектра поглощения растворов и проверка закона Бэра	62

1. ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Оптические методы измерения позволяют определить физические величины с очень большой точностью: например, длину волны света до $0,01 \text{ \AA}$, показатели преломления до 10^{-15} и т.д. Такая высокая точность достигается только потому, что оптические детали измерительных приборов изготавливаются также с очень высокой точностью и приборы тщательно юстируются. Например, поверхность высококачественных линз отличается от поверхности сферы не больше, чем на $0,005 \%$ и показатель преломления стекла не изменяется в пределах линзы больше, чем на $\pm 0,0001$. В объективах фотоаппаратов линзы центрированы с точностью $\pm 0,01 - 0,02/\text{мм}$.

Но даже высококачественный прибор не гарантирует высокую точность, если он не будет отрегулирован. Например, легко пропустить ошибку в $1/6-7/ \%$ при определении длины волны, если у монохроматора не ликвидирован параллакс, а в результате сопоставить данной спектральной линии волну, которая соответствует в действительности другому цвету.

Из вышесказанного следует: перед измерениями следует тщательно отъюстировать оптические приборы. Несмотря на то, что у различных приборов существуют разные приемы юстировки, можно выделить общие приемы юстировки, являющиеся одинаковыми для всех оптических систем: получение изображения, свободного от параллакса, юстировка гониометра, освещение спектрального прибора и т.д.

1.1. Получение изображения, свободного от параллакса

1.1.1. Задание

Ознакомление с параллаксом и получение изображения, свободного от параллакса.

1.1.2. Принадлежности

Оптическая скамья, линза, источник света, указатели, во-

нутое зеркало.

1.1.3. Ход работы

1.1.3.1. Введение.

При оптических измерениях часто определяется положение изображения относительно указателя или самого объекта /например, калибровка монохроматора, работы с гониометром и со сферическими зеркалами и т.д./. Если изображение и объект сравнения не расположены в одной плоскости, мы можем видеть изображение либо на месте указателя, либо справа или слева от него в зависимости от положения глаза наблюдателя. Такое явление называется параллаксом, а соответствующая ошибка - параллактической ошибкой.

Сущность параллакса объясняет рис. 1.1.

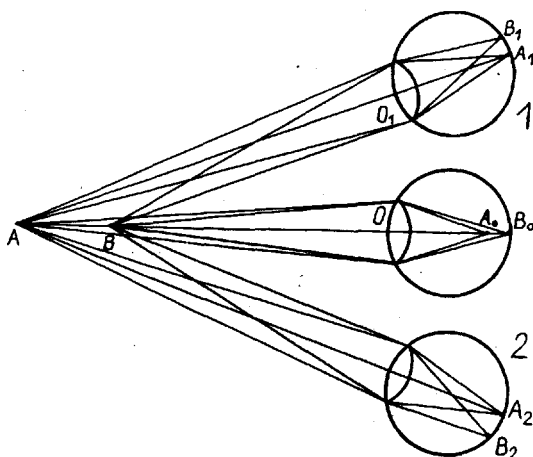


Рис. 1.1. Появление параллакса.

Пусть на рисунке в точке А находится указатель, а изображение объекта - в точке В. Если глаз наблюдателя находится на прямой АВ, мы видим указатель и изображение совмещающимися. Если глаз наблюдателя находится в точке 1, то изображение B_1 возникает справа от изображения указателя A_1 . В положении 2, наоборот,

рот, возникает изображение объекта B_2 слева от изображения указателя A_2 .

Величину параллакса характеризует угол с вершиной в центре глазной линзы и сторонами, проходящими через точки А и В. Этот угол ε называют параллактическим углом и его можно выразить так:

$$\varepsilon = \frac{b}{R} \sin \alpha,$$

где b - расстояние между точками А и В, R - расстояние от центра отрезка b до линзы глаза и α - угол между b и R .

Свободное от параллакса изображение можно получить только при наблюдении одним глазом. Если рассматривать изображение объекта и указателя одновременно двумя глазами, тогда мешает нам т.н. бинокулярный параллакс, предмет или изображение делятся [1].

1.1.3.2. Эксперимент.

1.1.3.2.1. Убедимся при помощи двух карандашей /или пальцев/, что существует бинокулярный параллакс.

1.1.3.2.2. Для нахождения положения изображения, свободного от параллакса, используем установку, схема которой представлена на рис. 1.2.

Перед источником света установлена щель D , изображение которой получается при помощи линзы L . Если указатель А расположен в той же плоскости, где получается и изображение щели, параллакса не наблюдается, т.е. изображение щели не смещается относительно указателя при перемещении глаза перпендикулярно направлению рассматривания /направление OO' /.

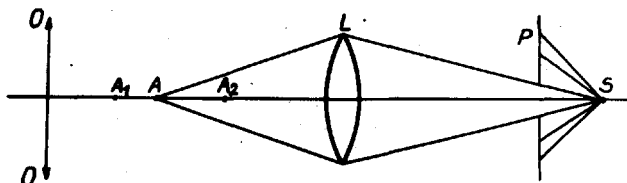


Рис. 1.2. Схема установки для нахождения положения изображения свободного от параллакса.

Если указатель расположен в точке A_1 или A_2 , наблюдается параллакс. Для нахождения изображения без параллакса можно сместить указатель A относительно фиксированных линзы и щели или сместить линзу относительно указателя и щели.

Работу можно проделать также при помощи вогнутого зеркала. Помещаем перед зеркалом на движущемся по оптической скамье штативе указатель. Штатив перемещаем по оптической скамье, пока острое указателя и его перевернутое изображение не совпадут. Совпадение должно быть без параллакса.

Изображение, свободное от параллакса, найдем либо при помощи линзы, либо при помощи зеркала. Результаты проверяет руководитель. Зарисовываем в протокол схему опыта.

I.2. Юстировка гониометра

I.2.1. Задание

Юстировка гониометра.

I.2.2. Принадлежности

Гониометр, плоскопараллельная пластина, источник света.

I.2.3. Ход работы

I.2.3.1. Введение.

Гониометр является прибором для измерения углов и в практике его используют при исследовании призм и дифракционных решеток /см. приложение I.1/. Некоторые типы гониометров могут быть использованы также в качестве спектрометров. Следовательно, требования к наладке гониометров действуют и для спектрометров. Принципиальная схема гониометра представлена на рис. I.3.

Гониометр считается налаженным /юстированным/, если:

- 1/ видно резкое изображение креста нитей окуляра зрительной трубы;
- 2/ зрительная труба сфокусирована на бесконечность;
- 3/ щель находится в фокальной плоскости объектива коллиматора /т.е. из коллиматора выходит параллельный пучок лучей/;

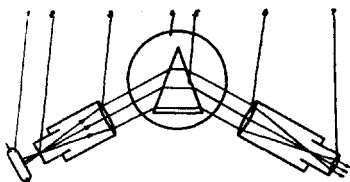


Рис. 1.3. Принципиальная схема гониометра.

1 - источник света, 2 - щель коллиматора, 3 - объектив коллиматора, 4 - столик, 5 - исследуемая призма, 6 - объектив зрительной трубы, 7 - окуляр зрительной трубы.

4/ оптические оси коллиматора и зрительной трубы перпендикулярны оси вращения столика;

5/ щель и вертикальная линия окулярного креста параллельны оси вращения столика.

Изображение, получаемое в гониометре, является высококачественным, и результаты измерений являются максимально точными только при выполнении вышепредставленных условий.

1.2.3.2. Юстировка гониометра.

1.2.3.2.1. Наладку начнем с фокусировки креста нитей окуляра зрительной трубы. Этого добьемся перемещением внешней линзы окуляра.

Дальше фокусируем зрительную трубу на бесконечность. У простейших гониометров рассматриваем через зрительную трубу какой-нибудь удаленный предмет /практически находящийся в бесконечности/. Перемещением окуляра относительно объектива добьемся получения резкого изображения предмета. Изображение предмета не должно давать параллакса относительно окулярного креста.

Зрительные трубы лучших гониометров снабжены т.н. окулярами Гаусса /см. рис. 1.4/. Внешняя линза 5 окуляра подвижна относительно нанесенного на стекло 3 перекрестия нитей. Перекрестие освещается при помощи лампы 1 и стеклянной пластины 4.

Если зрительная труба сфокусирована на бесконечность и перекрестие резко видно, то перекрестие находится в фокусе объекти-

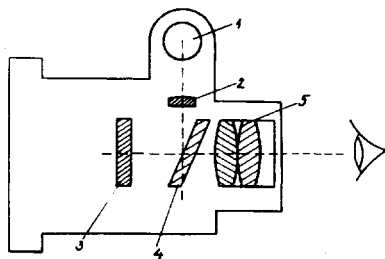


Рис. 1.4. Схема окуляра Гаусса.

ва, а исходящие из каждой его точки лучи параллельны между собой после прохождения объектива. Если эти лучи отразить обратно в объектив, то они образуют изображение перекрестия также в фокальной плоскости объектива. Это изображение называется автоколлимационным.

Для фокусировки зрительной трубы на бесконечность ставим на пути лучей, выходящих из объектива, плоскопараллельную стеклянную пластинку /или плоское зеркало/, от которой лучи отражаются в объектив. Когда перекрестие нитей и его автоколлимационное изображение видны одновременно, резко без параллакса, тогда зрительная труба сфокусирована на бесконечность.

1.2.3.2.2. Установление оптической оси зрительной трубы перпендикулярно оси вращения столика.

Помещаем плоскопараллельную стеклянную пластинку на столик так, чтобы она была параллельна мысленному отрезку, соединяющему два регулирующих винта столика. При таком положении пластинки изменением угла наклона столика только при помощи одного регулирующего винта.

Далее поворачиваем зрительную трубу относительно пластинки так, чтобы вертикальные линии перекрестия и его автоколлимационного изображения совпали. Для совмещения горизонтальных линий наклоним зрительную трубу /или меняем наклон пластинки/.

Поворачиваем столик на 180° . Если в этом случае горизонтальные линии совпадут, то можно считать, что ось зрительной трубы перпендикулярна оси вращения столика. В противном

случае совмещения перекрестия и изображения добиваются так, что половина поправки вносится наклонением зрительной трубы, половина — наклонением столика. Поворачиваем опять столик на 180° и совместим перекрестие и изображение вышеописанным методом. Повторяем такую регулировку, пока перекрестие и изображение не совпадут в обоих положениях пластины.

Теперь помещаем плоскопараллельную пластинку на столик так, чтобы она была параллельна прямой, соединяющей другие два регулирующих винта. Проверяем, выполняется ли при этом совпадение перекрестия и его изображения. При необходимости повторяем вышеописанные операции регулировки.

1.2.3.2.3. Размещение щели в фокусе объектива коллиматора.

Для этого поместим перед щелью источник света и смотрим на выходящие из коллиматора лучи в зрительную трубу. Если щель коллиматора расположена в фокусе объектива, тогда из коллиматора выходит параллельный пучок лучей, и в зрительной трубе, сфокусированной на бесконечность, видно резкое изображение щели. Следовательно, нужно перемещать щель, пока изображение щели не станет резким и не исчезнет параллакс относительно перекрестия. Внимание! Нельзя фокусировать изображение щели при помощи окуляра зрительной трубы! В противном случае зрительная труба не будет сфокусированной на бесконечность и придется повторить предыдущую часть работы.

1.2.3.2.4. Установка оси коллиматора перпендикулярно оси вращения столика.

Проверим параллельность щели и вертикальной нити перекрестия. Если это не так, делаем их параллельными путем вращения щели.

Для установки оси коллиматора перпендикулярно оси вращения столика уменьшим симметрично высоту щели с помощью диафрагмы и наклоним коллиматор с помощью соответствующего винта так, чтобы горизонтальная линия перекрестия делила изображение щели пополам.

Попросим преподавателя проконтролировать правильность настройки гониометра. Зарисовываем в протокол схему гониометра, записываем приемы настройки и отсчет по лимбу, при котором вертикальная нить перекрестия приходится на центр изображения щели /см. приложение 1.2/.

1.3. Освещение спектрального прибора

1.3.1. Задание работы

Оптимальное размещение источника света на оптической оси монохроматора и получение изображения спектральной линии, свободной от параллакса.

1.3.2. Приборы и принадлежности

Монохроматор УМ-2, источник света, спектральная лампа, конденсор, металлическая линейка.

1.3.3. Ход работы

1.3.3.1. Введение.

Проходящий через спектральный прибор световой поток зависит от способа освещения щели. Для того, чтобы использовать полностью световую силу и разрешающую способность прибора, нужно, чтобы свет от всех точек щели заполнял коллиматор полностью. Это условие выполняется, если источник света является большим, однородным и его можно поместить очень близко к щели. Если эти условия не выполнены, тогда используют конденсор. Параметры конденсора можно найти на основании рис. 1.5.

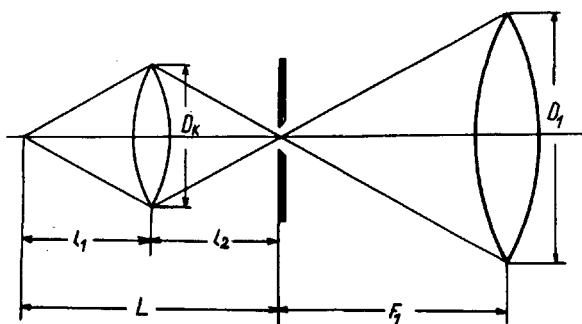


Рис. 1.5. Освещение щели конденсором.

На рис. 1.5 d_1 и f_1 - диаметр и фокусное расстояние объектива коллиматора, d_k - диаметр конденсора. Если источник света

расположен на расстоянии ℓ от щели и мы хотим его проэктировать на щель с увеличением β , то фокусное расстояние конденсора f_k найдем из системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{1}{\ell_1} + \frac{1}{\ell_2} = \frac{1}{f_2} \\ \frac{\ell_2}{\ell_1} = \beta \\ \ell_1 + \ell_2 = \ell \end{cases}$$

Решая систему, найдем, что

$$f_k = \frac{\beta \ell}{(\beta + 1)^2}$$

Диаметр конденсора определяется из условия: свет заполняет весь объектив коллиматора. Для этого нужно, чтобы

$$\frac{d_k}{\ell_2} \geq \frac{d_1}{f_1}$$

Если выберем $\beta = 1$, тогда $\ell_1 = \ell_2 = \frac{\ell}{2}$; $f_k = \frac{\ell}{4}$
и $\frac{d_k}{f_k} \geq \frac{2d_1}{f_1}$, т.е. относительное отверстие конденсора должно быть вдвое больше относительного отверстия объектива коллиматора.

Объектив коллиматора нескоррегирован относительно хроматических аберраций. Следовательно, фокусное расстояние объектива зависит от длины волны света. Поэтому изображение входной щели в плоскости выходной щели /или плоскости указателя зрительной трубы/ возникает только при одной определенной длине волны. При других длинах волн изображение возникает впереди или позади этой плоскости.

Указанное обстоятельство не позволяет точно определить местоположение спектральной линии, поскольку начинает мешать параллакс. Для устранения параллакса объектив сделан подвижным, его можно смещать вдоль оптической оси. При калибровке монохроматора освещают указатель с помощью светофильтров светом того же цвета, что и спектральная линия и отыскивается такое положение объектива коллиматора, при котором спектральная линия видна на фоне указателя без параллакса.

1.3.3.2. Оптимальное размещение источника света на оптической оси монохроматора.

Относительное отверстие монохроматора УМ-2 равно $1/6$. Следовательно, относительное отверстие конденсора должно быть не меньше $1/3$. Допустим для примера, что мы имеем конденсор с $f_k = 94$ мм. Вычисляем относительное отверстие конденсора. Если оно оказывается равным или большим, чем $1/3$, найдем l_1 , l_2 и l при условии, что $\beta = 1$. Поместим источник света на расстоянии l от входной щели монохроматора.

Установка источника света на оптическую ось монохроматора происходит следующим образом. Регулируем высоту и ширину входной щели равными 0,5 мм. Выходную щель открываем, максимально. Смотрим в выходную щель и смещаем источник света в перпендикулярных направлениях к оптической оси монохроматора, пока мы не увидим его в середине поля зрения. В таком случае источник света находится на оптической оси монохроматора.

Теперь ставим конденсор на расстоянии l_2 от входной щели. В таком случае должно возникать четкое изображение источника света в плоскости входной щели. В случае надобности смещаем конденсор слегка параллельно оптической оси. Наконец, сдвигаем конденсор перпендикулярно оптической оси, пока изображение источника света не попадет точно на середину входной щели.

Заменим выходную щель зрительной трубой, и высоту входной щели возьмем равной $1 - 1,5$ см. На место источника света поместим спектральную лампу и включим ее. Поворачивая барабан монохроматора выводим какую-либо спектральную линию на указатель. Включим осветитель указателя и подберем подходящий светофильтр. Проверяем, видна ли линия относительно указателя без параллакса. При наличии параллакса ликвидируем его, перемещая объектив коллиматора поворотом соответствующего винта.

Записываем в протокол показание /учитывая и нониус!/ со шкалы. После проверки результата проделанной работы преподавателем, записываем в протокол приемы установки источника света.

Литература

1. Л. Мартин. Техническая оптика - М.: ГИИМА, 1960, гл. IV.
2. А.А. Шишковский. Прикладная физическая оптика - М.: Физматгиз, 1961, гл. 2, § 6.
3. А.Н. Зайдель, Г.В. Островская, Ю.И. Островский. Техника и практика спектроскопии - М.: Наука, 1972, гл. У § 2.

Приложение I.I.

Описание устройства гониометра

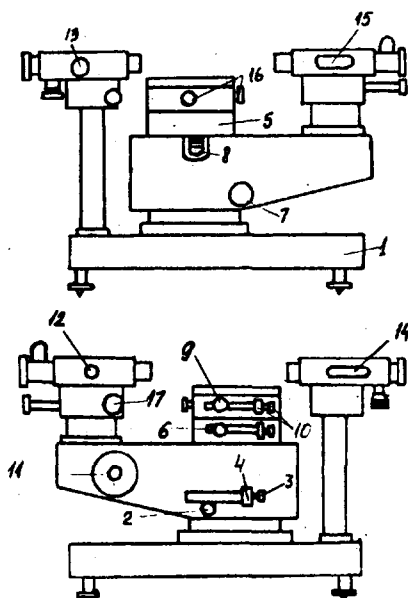


Рис. I.6. Гониометр ГС-5.

Прибор состоит из следующих основных частей: коллиматора, зрительной трубы, отсчетного устройства, основания с осевой системой и столиком.

Коллиматор закреплен неподвижно на основании I, а зрительная труба крепится к алидаде, которая может вращаться около центральной оси прибора. Для неподвижного соединения алидады и вместе с ней и зрительной трубы с основанием используется винт 2. Малые перемещения алидады выполняются микрометрическими винтами 3 и 4 /для грубого и тонкого наведения/.

На отсчетном устройстве гониометра отсчитывается угол между алидадой /и с ней связанной зрительной трубой/ и нижней частью столика 5. Последнюю можно фиксировать неподвижно относительно основания гониометра с помощью винта 6.

Грубая установка нижней части столика осуществляется поворотом столика рукой или винтом 6. При необходимости можно сцеплять нижнюю часть столика с алидадой, используя рычаг 8.

Для лучшего маневрирования прибором при выполнении измерений верхняя часть столика выполнена отдельно. Винтом 9 ее можно соединять с нижней частью столика. Для точного регулирования положения столика относительно его нижней части служат микрометрические винты 10. При выполнении измерений надо учитывать, что при вращении только верхней части столика, показание отсчетного устройства не меняется, поскольку оно связано только с нижней частью столика.

Маховиком 11 можно передвигать изображения шкал, видимые в окуляре отсчетного устройства при снятии отсчета.

Фокусировка зрительной трубы и коллиматора производится маховичками 12 и 13 по шкалам 14 и 15.

Приложение I.2.

Снятие отсчета со шкалы гониометра

Поле зрения отсчетного микроскопа приведено на рис. I.7. В левом окне /рис. I.7, а/ видны диаметрально противоположные участки лимба и неподвижный вертикальный штрих /индекс/ N , в правом окне /рис. I.7, б/ видна шкала оптического микрометра с горизонтальным индексом E .

Для снятия отсчета вертикальную нить перекрестия зрительной трубы устанавливают на центр изображения входной цели и фиксируют алидаду винтом 2. Если при фиксации нить переместится относительно изображения, точную установку производит микрометрическими винтами 3 и 4. Далее поворачивают маховичок II оптического микрометра до тех пор, пока в левом окне верхние и нижние двойные штрихи шкалы лимба не будут точно совмещаться. В этом случае число градусов будет равно ближайшей видимой слева от индекса N цифре, число десятков минут равно числу интервалов, заключенных между верхним штрихом, который соответствует отсчитанному числу градусов, и нижним оцифрованным штрихом, отличающимся от верхнего на 180° . Число единиц минут отсчитывается по шкале микрометра в правом окне по левому ряду чисел, число секунд — по правому ряду чисел, согласно положения индекса E .

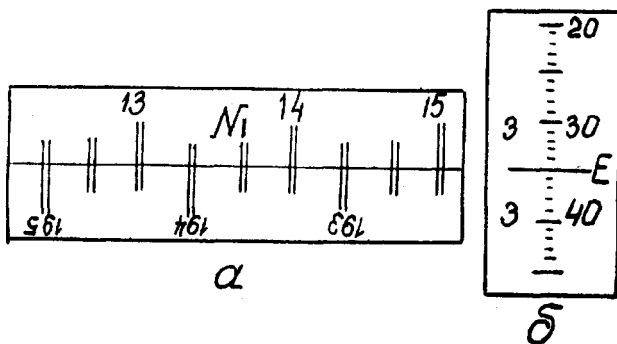


Рис. I.7. Поле зрения микроскопа.

Цена наименьшего деления на шкале микрометра Г", разрешающая способность же зрительной трубы З" и поэтому углы нельзя измерить более точно.

На рис. I.7 отсчет по шкале составляет $13^{\circ}43'35''$.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ЛИНЗЫ И КАРДИНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Задание

Определить фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линз и кардинальные элементы оптической системы.

2.2. Принадлежности

Оптическая скамья, рейтер, собирающая линза, рассеивающая линза, оптическая система, осветитель, белый экран.

2.3. Элементы теории

Оптической системой называют комплект оптических деталей /линз, зеркал, призм и т.д./, при помощи которого можно получить изображение объекта на приемке света /глаз, экран, фотоэлемент и т.д./ или который трансформирует пучки света, идущие от источника.

Оптическую систему называют идеальной, если она, в случае широкого пучка света, дает свободное от искажения изображение конечных размеров. В данной работе рассматриваем только идеальные оптические системы, составленные из линз. Как показывает теория, в идеальной оптической системе можно получить изображение объекта, не рассматривая подробно ход лучей. Достаточно знания так называемых кардинальных элементов систем.

Идеальная оптическая система обладает осью симметрии, которая называется оптической осью. Это воображаемая линия, которая проходит через центры кривизны всех преломляющих поверхностей /на рис. 2.1, линия O_1O_2 /. Пусть L_1L_1 и L_2L_2 - крайние поверхности, ограничивающие оптическую систему. Рассмотрим луч A_1B_1 , падающий на систему от бесконечно удаленной точки из пространства предметов. Пусть он параллелен главной оптической оси. При выходе из системы /ход луча внутри системы нас не интересует/ он пойдет, допустим, по направлению луча C_2D_2 . Пересечение последнего с главной оптической осью даст изображение бесконечно удаленной точки, а для системы эта точка /т. F_2 /

будет главным фокусом в пространстве изображений /задним фокусом/.

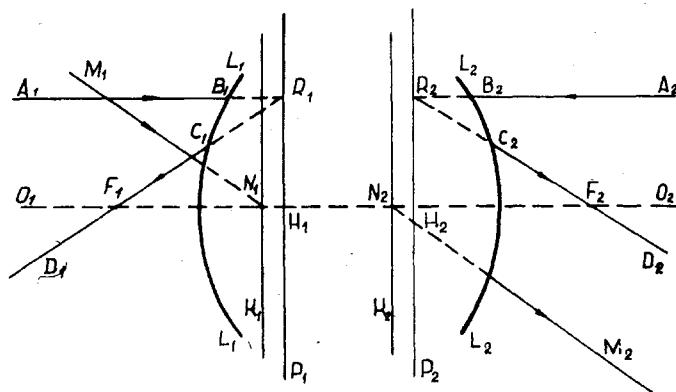


Рис. 2.1. Кардинальные элементы оптической системы.

Луч A_2B_2 , входящий в систему справа по продолжению луча A_1A_2 , выйдет из системы слева, допустим, по направлению C_1D_1 . Точку F_1 по аналогии с точкой F_2 называют главным фокусом в пространстве предметов /передним фокусом/.

Плоскости, заключающие в себе фокусы и перпендикулярные главной оптической оси, называют фокальными плоскостями.

Продолжим теперь C_1D_1 и C_2D_2 до пересечения с продолжениями A_1B_1 и A_2B_2 и отметим точки пересечения R_1 и R_2 . Эти точки сопряжены, т.е. они являются изображением друг друга. Из построения ясно, что точки R_1 и R_2 лежат на одинаковом расстоянии от главной оптической оси, т.е. $R_1H_1 = R_2H_2$ /линейное увеличение $\beta = +1$ /.

Можно показать, что в идеальной системе каждой точке плоскости P_1 , перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через R_1 , найдется сопряженная точка в аналогичной плоскости P_2 . Сопряженные плоскости P_1 и P_2 , отображающие друг друга с коэффициентом линейного увеличения $\beta = +1$, называются главными плоскостями, а точки H_1 и H_2 , в которых эти плоскости пересекают-

ся с оптической осью, главными точками системы.

Расстояния от главных точек до фокусов называются фокусными расстояниями: $f_1 = H_1 F_1$, $f_2 = H_2 F_2$. В том случае, когда с обеих сторон системы находится одна и та же среда /например, воздух/
 $f_1 = f_2 = f$.

Можно показать, что в идеальной оптической системе существуют и такие точки N_1 и N_2 , в которых угловое увеличение $\gamma^* = +1$. Точки эти называются узловыми точками. Сопряженные лучи $/M_1 N_1$ и $M_2 N_2/$, проходящие через узловые точки, параллельны друг другу. Плоскости, проходящие через узловые точки перпендикулярно к оптической оси $/K_1$ и $K_2/$, называются узловыми плоскостями.

Если по обе стороны от системы находится одна и та же среда, то узловые точки совпадают с главными точками. Названные шесть точек и шесть плоскостей и являются кардинальными элементами оптической системы.

Если известны местоположения фокусов и главных плоскостей оптической системы, то нахождение изображения в оптической системе производится также, как в линзе. Это иллюстрируется на рис. 2.2.

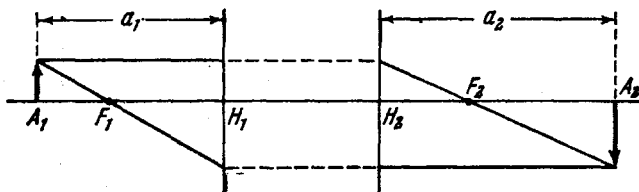


Рис. 2.2. Нахождение изображения в оптической системе.

Легко показать, что расстояние от объекта до передней главной плоскости $-a_1^*$, расстояние от изображения до задней плоскости a_2 и фокусное расстояние f связаны следующим образом:

$$\frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_1} = \frac{1}{f}. \quad /2.1/$$

В практике часто имеют дело с такими оптическими системами, размеры которых вдоль оптической оси, значительно меньше их фокусных расстояний. В этом случае совпадают точки R_1 и R_2 и совпадают главные плоскости /а также узловые плоскости/. Совпавшие главные плоскости становятся осевой плоскостью тонкой линзы, а пересечение этой плоскости с оптической осью системы дает оптический центр линзы /кстати главные точки совпадают именно в этой точке/.

Такую систему называют тонкой линзой. Формула /2.1/ справедлива и для тонкой линзы, только расстояния $-a_1$, a_2 и f отсчитывают от центра линзы.

2.3.1. Методы измерений

В данной работе определяем фокусные расстояния собирающей и рассеивающей линз, а также местоположения фокальных и главных плоскостей оптической системы. Измерения производим на оп-

* Здесь и далее учитывается правило знаков.

тической скамье, вдоль которой можно перемещать рейтеры с линзами и экраном. Объектом служит прозрачная шкала с делениями. Шкала освещается осветителем.

2.3.1.1. Определение фокусного расстояния собирающей линзы.

Для определения фокусного расстояния собирающих линз существует много методов; рассмотрим два из них.

1 метод. Для определения фокусного расстояния используют формулу $1/f = 1/a + 1/b$. В этом случае для различных расстояний a_1 объекта от линзы находят соответствующие расстояния b_2 изображения от линзы. Измерения выполняются как для увеличенных, так и для уменьшенных изображений объекта, в каждом случае по крайней мере три раза. Находят средние значения a_2 и строят график в координатах $1/a_1$ и $1/a_2$. Полученная прямая пересекает оси в точках соответствующих $1/f$.

2. метод. Фокусное расстояние собирающей линзы можно найти с помощью зрительной трубы, которая сфокусирована на бесконечность. Для этого вместо экрана на рейтер помещают зрительную трубу сфокусированную на бесконечность и находят такое положение линзы, чтобы в зрительную трубу можно было видеть резкое изображение объекта. В этом случае расстояние объекта от линзы равно фокусному расстоянию линзы. /Почему? Выполните юстировку гониометра!/. Измерения следует повторить по крайней мере 3 раза и взять среднее значение.

2.3.1.2. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы.

Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы несколько сложнее, поскольку в этом случае получается не действительное, а мнимое изображение объекта. Эту трудность помогает преодолеть использование вспомогательной собирающей линзы.

Вначале помещают на оптическую скамью только собирающую линзу и находят резкое изображение объекта на экране в положении S_1 /см. рис. 2.3/.

Теперь позади собирающей линзы помещают рассеивающую линзу. Изображение объекта в результате перемещается в точку S_2 . Определив местоположение рассеивающей линзы, можно найти расстояния a_1 и a_2 . Измерения проводят при различных положениях вогнутой линзы /в каждом положении делают по крайней мере по

18
4.6.24
4-2

12.

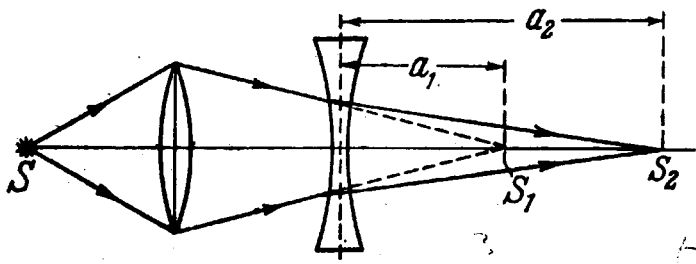


Рис. 2.3. Определение фокусного расстояния рассеивающей линзы.

по 3 измерения/. На основании средних значений a_1 и a_2 строят график в координатах $\frac{1}{a_1}$ и $\frac{1}{a_2}$ и определяют фокусное расстояние рассеивающей линзы.

Фокусное расстояние рассеивающей линзы также можно найти с помощью зрительной трубы, сфокусированной на бесконечность. Если изображение S_1 , полученное в собирающей линзе, совпадает с передним фокусом рассеивающей линзы /передний фокус рассеивающей линзы расположен позади линзы/, то изображение S_2 возникает в бесконечности, т.е. из линзы выходит параллельный пучок лучей. Параллельность лучей можно проверить при помощи зрительной трубы, зная положение фокуса / в данном случае S_1 / и местоположение рассеивающей линзы, легко найти фокусное расстояние последней.

2.3.1.3. Определение кардинальных элементов оптической системы

Для определения кардинальных элементов в настоящей работе используем следующий метод. Пусть объект с линейным размером y находится на расстоянии $-x_1$ от переднего фокуса F_1 . Размер изображения объекта пусть будет $-y_1$ /см. рис. 2.4/. Линейное увеличение β_1 выражается так

$$\beta_1 = \frac{y_1}{y} = -\frac{f}{x_1}$$

12.2/

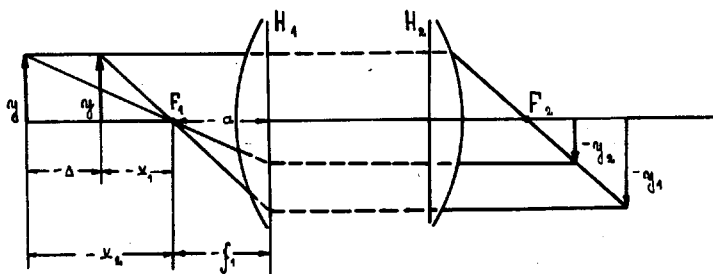


Рис. 2.4. Определение кардинальных элементов оптической системы.

Если сместить объект на расстояние x_2 от переднего фокуса, то линейное увеличение β_2 будет

$$\beta_2 = \frac{y_2}{y} = -\frac{f}{x_2} \quad /2.3/$$

Из формул /2.2/ и /2.3/ можно найти, что

$$f = \frac{\Delta}{\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2}} \quad /2.4/$$

где $\Delta = x_2 - x_1$.

Для определения фокусных расстояний оптической системы из уравнения /2.4/ необходимо найти линейные увеличения в двух различных положениях системы и расстояние между этими двумя местоположениями. Для увеличения точности измерений Δ надо выбрать так, чтобы β_1 и β_2 значительно отличались друг от друга. Измерения следует повторить по меньшей мере 3 раза и найти среднее значение.

Для определения местонахождения главных плоскостей системы недостаточно знания фокусных расстояний, надо знать и местоположения фокусов на оптической оси. Для этого используют опять же зрительную трубу, сфокусированную на бесконечность, как и в пункта 2.3.1.1 и 2.3.1.2. Измеряя расстояние $-a$ /см. рис. 2.4/, можно найти местоположение главных плоскостей.

2.4. Эксперимент

Перед началом измерений устанавливаем оптические оси линз параллельно оси оптической скамьи. Для линз с малой оптической силой это выполняется на глаз. Наведение изображения на резкость также осуществляется при помощи глаза.

Используемые линзы имеют хроматическую aberrацию, поэтому измерения будут точнее, если на пути света поместить светофильтр.

2.4.1. Находим фокусные расстояния собирающей линзы двумя методами согласно пункту 2.3.1.1. Расстояния $-a_1$ и a_2 найдем по показаниям шкалы. Правильные результаты получаются, если объект совмещен с началом шкалы на скамье и указатели рейтеров лежат в плоскостях линзы и экрана.

Проверку этих условий осуществим следующим образом. Измеритель расстояний / дальномер / помещаем так, что один его конец соприкасается с объектом, а другой осторожно приводим в соприкосновение с центром линзы. Сравниваем отсчет по шкале скамьи с длиной дальномера. Поворачиваем линзу на 180° и повторяем измерения. Если показания по шкале отличаются меньше, чем на 2 мм от длины дальномера, не следует учитывать поправки при измерении расстояний по шкале оптической скамьи.

Аналогично проверяем и показание указателя рейтера с экраном.

2.4.2. Определяем фокусные расстояния рассеивающей линзы двумя методами согласно пункту 2.3.1.2. Перед измерениями опять же проверяем правильность положения линзы относительно указателя рейтера. Оценим ошибку измерений.

2.4.3. Определим фокусные расстояния оптической системы и местоположения фокусов и главных точек согласно пункту 2.3.1.3. Расстояние $-a$ / см. рис. 2.4/ находим с помощью металлической линейки, учитывая то обстоятельство, что центр внешней преломляющей поверхности неподвижной линзы лежит в одной плоскости с концом кюветы.

Расстояние между центрами внешних преломляющих поверхностей указано на корпусе системы.

Для нахождения увеличения нужно найти длину изображения отрезка шкалы и разделить ее на собственно длину этого отрезка шкалы /цена наименьшего деления шкалы 1 мм/.

На основании вычислений /в соответствующем масштабе/ делаем рисунок оптической системы, поместив местоположения всех кардинальных элементов.

Оценим ошибку измерений.

2.5. Вопросы

1. Дать определение кардинальным элементам системы.
2. Какие существуют правила в отношении использования знаков в геометрической оптике?
3. Получить формулу /2.1/.
4. Почему нельзя настраивать зрительную трубу на бесконечность через оконное стекло?
5. Как в отсутствие вспомогательных средств установить с какой линзой имеем дело: с собирающей или рассеивающей?

2.6. Литература

1. И.В. Савельев. Курс общей физики, т.III - М.: Наука, 1973, §§ 8 - 12.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ УВЕЛИЧЕНИЯ

3.1. Задание

Конструирование моделей зрительных труб Кеплера и Галилея. Изготовление модели микроскопа. Опытное определение увеличения и сравнение с расчетным значением.

3.2. Принадлежности

Оптическая скамья, комплект выпуклых и вогнутых линз, рейтер, источник света, объект наблюдения, экран, вспомогательная зрительная труба, металлическая линейка.

3.3. Элементы теории

Для успешного выполнения работы необходимо знание следующих понятий и принципов: ход лучей в зрительной трубе и микроскопе, телескопическая оптическая система, линейное и угловое увеличение.

Опишем коротко конструкцию и принцип действия зрительных труб Кеплера и Галилея, а также микроскопа, приведем формулы для вычисления их увеличения. В выводе всех формул предполагается, что глаз наблюдателя сфокусирован на бесконечность.*

3.3.1. Зрительная труба Кеплера /астрономическая/.

В зрительной трубе Кеплера задний фокус объектива совпадает с передним фокусом окуляра. В этом случае параллельный пучок лучей входящий в объектив, остается параллельным и после выхода из окуляра /см. рис. 3.1/.

* В действительности это не всегда может быть так, поскольку нормально глаз можно сфокусировать в промежутке от 10 см до ∞ . Этим обуславливается разница теоретического и практического значений увеличения.

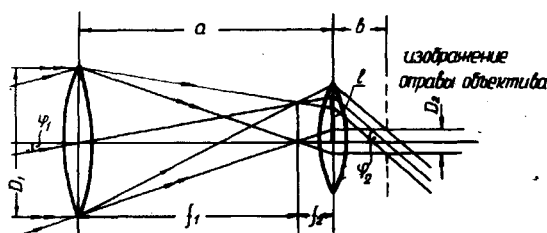


Рис. 3.1. Ход лучей в зрительной трубе Касселера.

Пусть параллельный пучок лучей падает в объектив под углом φ_1 и выходит под углом φ_2 . Угловое увеличение зрительной трубы тогда выразится так

$$\gamma = \frac{tg \varphi_2}{tg \varphi_1} \quad /3.1/$$

Ширина пучка D_1 , попадающего в объектив, определяется диаметром объектива, ширина же D_2 , выходящего из окуляра пучка, определяется изображением оправы объектива. Из рисунка видно, что

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad /3.2/$$

и

$$\frac{tg \varphi_2}{tg \varphi_1} = \frac{\frac{l}{b}}{\frac{l}{f_1 + f_2}} = \frac{f_1 + f_2}{b} \quad /3.3/$$

Величину b можно выразить из формулы линзы:

$$b = \frac{f_2 \cdot a}{f_2 - a},$$

но поскольку $a = f_1 + f_2$, получаем, что

$$b = \frac{f_2}{f_1} (f_1 + f_2). \quad /3.4/$$

Из формул /3.1/, /3.2/, /3.3/ и /3.4/ имеем

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad /3.5/$$

3.3.2. Зрительная труба Галилея.

Если в астрономической зрительной трубе заменим собирающий окуляр рассеивающим, получим так называемую трубу Галилея, которая дает прямое изображение предмета /см. рис. 3.2/. В зрительной трубе Галилея расстояние между объективом и окуляром равно

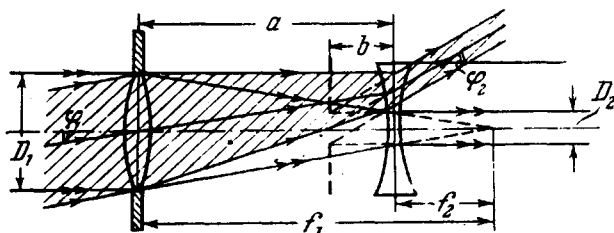


Рис. 3.2. Ход лучей в зрительной трубе Галилея.

разности их фокусных расстояний /точнее их алгебраической суммы/. Можно показать, что и для зрительной трубы Галилея справедлива формула /3.5/.

3.3.3. Микроскоп.

Простейший микроскоп состоит из двух линз: объектива и окуляра. Предмет / в данном случае стрела длиной ℓ / помещается перед первым фокусом объектива в непосредственной близости от него. Изображение предмета рассматривается через окуляр как через лупу.

Построение изображения в микроскопе приведено на рис. 3.3.

Увеличение микроскопа определяется также формулой /3.1/, т.е.

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1},$$

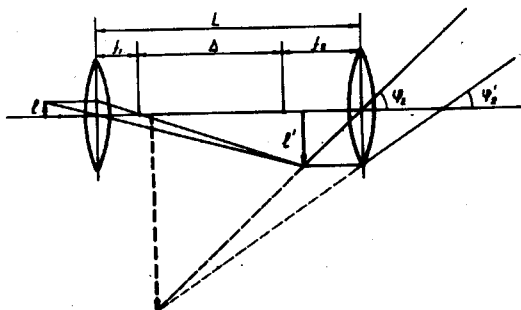


Рис. 3.3. Построение изображения в микроскопе.

где φ_1 угол, под которым виден объект невооруженным глазом на расстоянии лучшего зрения α_0 /равняется для нормального глаза 25 см/. Следовательно,

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{l}{\alpha_0}. \quad /3.6/$$

Далее найдем $\operatorname{tg} \varphi_2$. Из рисунка видно, что

$$\operatorname{tg} \varphi_2 \approx \frac{l'}{f_2}, \quad /3.7/$$

поскольку изображение предмета, даваемое объективом, находится в микроскопе практически в фокусе окуляра. Поэтому можно приблизительно считать и равными углы φ_1 и φ_2 .

Итак, мы получили из /3.6/ и /3.7/

$$\gamma = \frac{l' \alpha_0}{f_2 l} \quad /3.8/$$

В микроскопах объективы обычно очень короткофокусные, поэтому $\Delta \gg f_1$, поэтому можно считать, что

$$\frac{l'}{l} \approx \frac{\Delta}{f_1},$$

и можно получить:

$$\gamma = \frac{\Delta \alpha_0}{f_1 \cdot f_2}. \quad /3.9/$$

Величина Δ называется длиной тубуса микроскопа и ее можно определить, зная расстояние между объективом и окуляром, а также фокусные расстояния f_1 и f_2 по формуле

$$\Delta = L - (f_1 + f_2). \quad /3.10/$$

3.4. Ход работы

3.4.1. Подготовка к измерениям.

В случае любых оптических систем важно центрировать все входящие в нее линзы. В случае плохо центрированной системы лучи могут сильно отклоняться от оптической оси и вовсе не попасть в глаз наблюдателя.

В данной работе особенно важна юстировка линз по высоте, поскольку в горизонтальной плоскости юстировка обеспечивается оптической скамьей. Юстировку в вертикальном направлении проводят следующим образом.

Перед окном осветителя помещено матовое стекло с пластинкой, на которую нанесены три горизонтальных штриха.* К осветителю вплотную придвинем полупрозрачный экран с горизонтальным штрихом. Высоту экрана установим такой, чтобы центральный штрих на пластинке был на одном уровне со штрихом на экране. Теперь рейтер с экраном сместим на противоположный конец оптической скамьи и между осветителем и экраном поместим собирающую линзу. Линзу смещаем до тех пор, пока на экране не получится четкое изображение штрихов пластинки. Высоту линзы изменяем так, чтобы изображение центрального штриха совпало со штрихом на экране. Смещая линзу и экран, проверяем совпадение штрихов и для других положений.

Далее помещаем на оптическую скамью другую линзу /соответственно надобности – собирающую или рассеивающую/ и регулируем

* Эти три штриха служат далее и наблюдаемым объектом.

также и ее высоту так, чтобы штрихи совпали.

В силу неточности изготовления рейтеров и оправ линз, центры линз могут быть смещены немного и в горизонтальном направлении. В нашем опыте это, однако, не существенно, поскольку объектами служат горизонтальные штрихи.

Для получения высококачественного изображения линзы должны быть перпендикулярны оптической оси. Это проверяем на-глаз и в случае необходимости поворачиваем линзу в держателе.

При моделировании зрительной трубы важно, чтобы в нее попал параллельный пучок света. Для этого помещают объект в фокус собирающей линзы; такую установку называют коллиматором.

Для юстировки коллиматора используют вспомогательную зрительную трубу, которая предварительно сфокусирована на бесконечность /см. руководство работы "Юстировка оптических приборов"/. Перед юстировкой коллиматора надо отрегулировать и высоту вспомогательной зрительной трубы. Методику этой регулировки следует выработать самостоятельно.

Для моделирования оптических приборов необходимо знать фокусные расстояния используемых линз. Фокусные расстояния собирающих линз с точностью, достаточной для нашей работы, можно определить следующим образом. Помещаем линзу за коллиматором и перемещаем экран до тех пор, пока на нем не получится резкое изображение объекта. Расстояние от линзы до экрана и будет примерно фокусным расстоянием.

О методике нахождения фокусных расстояний рассеивающих линз можно прочитать в руководстве "Определение фокусных расстояний линз и кардинальных элементов оптической системы".

3.4.2. Моделирование зрительной трубы Кеплера и определение ее увеличения.

Из имеющихся в наличии линз соберем модель зрительной трубы Кеплера с увеличением, заданным преподавателем / $\gamma = 1,5 - 5$ /. Увеличение рассчитаем по формуле /3.5/, зная фокусные расстояния имеющихся линз. Объектив конструируемой зрительной трубы помещаем вблизи коллиматора, окуляр же на такое расстояние от объектива, чтобы ход лучей через зрительную трубу, был телескопическим. Условие $\alpha = f_1 + f_2$ /см. рис. 3.1/ облегчает найти правильное положение окуляра. Параллельность лучей, выходящих

из окуляра, проверяем с помощью вспомогательной зрительной трубы, наведенной на бесконечность. При правильном расположении окуляра в зрительную трубу видно резкое изображение объекта. В случае необходимости надо уточнить расстояние между объективом и окуляром.

Теперь определяем увеличение сконструированной зрительной трубы, измерив диаметр объектива D_1 и диаметр D_2 изображения объектива в окуляре. Для этого позади окуляра помещаем экран, на котором видно изображение /круглое светлое пятно/.

Изображение объектива возникает на экране, конечно, только в том случае, если весь объектив заполнен светом. Если диаметр коллиматора меньше диаметра объектива, необходимо непосредственно за объективом /вплотную/ поместить лист белой бумаги и измерить диаметр D_1 светлого пятна на нем. Увеличение рассчитаем по формуле $\gamma = \frac{D_1}{D_2}$.

Увеличение зрительной трубы можно найти и по формуле /3.1/. Для этого надо измерить угол φ_1 , под которым объект виден без зрительной трубы, и угол φ_2 , под которым он виден в трубу. Для определения углов за окуляром помещаем зрительную трубу, сфокусированную на бесконечность. В поле зрения теперь видны изображения трех штрихов. С помощью микрометра на вспомогательной зрительной трубе измеряем расстояние ℓ_2 , между двумя крайними штрихами. Очевидно, что $\ell_2 = k \operatorname{tg} \varphi_2$, где k - коэффициент, характеризующий увеличение вспомогательной зрительной трубы. Теперь уберем с оптической скамьи линзы, составляющие исследуемую зрительную трубу, и определим вновь расстояние между крайними штрихами $\ell_1 = k \operatorname{tg} \varphi_1$. Увеличение γ будет

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} = \frac{\ell_2}{\ell_1}$$

Сравним полученные данные между собой.

3.4.3. Моделирование зрительной трубы Галилея и определение ее увеличения.

Из имеющихся в наличии линз соберем зрительную трубу Галилея с увеличением, заданным преподавателем / $\gamma = 2 - 5$ /. Сборка модели и ее проверка производится так же, как и для зритель-

ной трубы Кеплера. /Замечание: при отыскании правильного положения окуляра надо помнить, что его фокусное расстояние отрицательно./

Поскольку в случае зрительной трубы Галилея в окуляре получается мнимое изображение объектива, увеличение можно найти только, определив φ_1 и φ_2 /также как и в трубе Кеплера/.

3.4.4. Моделирование микроскопа и определение его увеличения.

Соберем микроскоп из имеющихся линз, согласно заданному преподавателем увеличению $\gamma = 3 - 10$ /. Для этого надо взять две собирающие линзы с подходящим фокусным расстоянием и определить соответствующее значение Δ длины тубуса. Расстояние L между объективом и окуляром найдем по формуле $/3.10/$.

Далее помещаем объектив и окуляр на оптическую скамью так, чтобы расстояние между ними было L . Теперь передвигаем объект /осветитель/ по скамье до тех пор, пока в окуляре микроскопа не возникает резкое изображение объекта.

Увеличение микроскопа можно определить, сравнив угол зрения объекта через микроскоп с углом зрения, под которым виден объект на расстоянии $/Q_0 = 25 \text{ см}/$ лучшего зрения при рассматривании невооруженным глазом. Для этого рядом с оптической скамьей помещаем вертикально измерительную линейку. Рассматривая одним глазом изображение объекта в окуляре, а другим шкалу линейки, определяем сколько делений линейки укладывается между крайними делениями объекта. Пусть это будет N . Измерив расстояние между крайними штрихами на объекте $/n - \text{тех же делений, что и на линейке}/$, можно вычислить увеличение микроскопа

$$\gamma = \frac{N}{n} \quad /3.11/$$

Определим увеличение микроскопа по меньшей мере 3 раза, найдем среднее и сравним с заданным.

3.5. Вопросы

1. Объяснить разницу между ходом лучей и конструированием изображения.
2. Найти связь между линейным и угловым увеличениями.

3. Показать, что и в случае зрительной трубы Галилея справедлива формула /3.5/.

4. Почему описанным в работе методом нельзя точно определить фокусное расстояние собирающей линзы?

5. Как повысить точность определения увеличения микроскопа?

6. Показать, что при наблюдении через зрительную трубу, кратчайшим расстоянием d , на которое можно сфокусировать глаз, будет $d = \gamma^2 d_0$; где γ - увеличение трубы, d_0 - минимальное расстояние для резкого видения объекта.

7. Доказать, что увеличение микроскопа можно определить и по формуле /3.II/.

3.6. Литература

1. Г.С. Ландсберг. Оптика - М.: Наука, 1976, гл. XIV.

2. И.В. Савельев. Курс общей физики, т.III - М.: Наука, 1971, гл. II.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ, ПОЛЯ ЗРЕНИЯ И РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗРИТЕЛЬНОЙ ТРУБЫ

4.1. Задание

Ознакомление с устройством зрительной трубы. Определение увеличения, поля зрения и разрешающей способности зрительной трубы.

4.2. Принадлежности

Зрительная труба на штативе, измерительная шкала, тест-таблица, коллиматор с источником света, измерительная лента, штангенциркуль.

4.3. Элементы теории

Для успешного выполнения работы нужно предварительно усвоить принципы геометрической оптики, знать ход лучей в зрительной трубе и свойства элементов оптических систем /см. литературу [1], [2]/.

4.3.1. Зрительная труба Кеплера.

Зрительная труба представляет собой оптическую систему, составленную из объектива и окуляра. Лучи света, идущие от далеких объектов, можно считать параллельными. Поскольку в нормальном, ненапряженном состоянии глаз человека сфокусирован на бесконечность, а наблюдение в зрительную трубу происходит с помощью глаза, то зрительная труба устроена так, что выходящие из нее лучи являются параллельными. Отсюда следует, что в целом зрительная труба не имеет фокусов, т.е. параллельные лучи после прохождения через трубу остаются параллельными.

Такие оптические системы, в которых отсутствуют фокусы, называют афокальными.

Рассмотрим ближе так называемую зрительную трубу Кеплера, которая в простом случае состоит из двух положительных линз /рис. 4.1/. Длиннофокусный объектив дает в своей задней фокальной плоскости действительное перевернутое изображение объекта. Короткофокусный окуляр служит для наблюдения изображения, даваемого

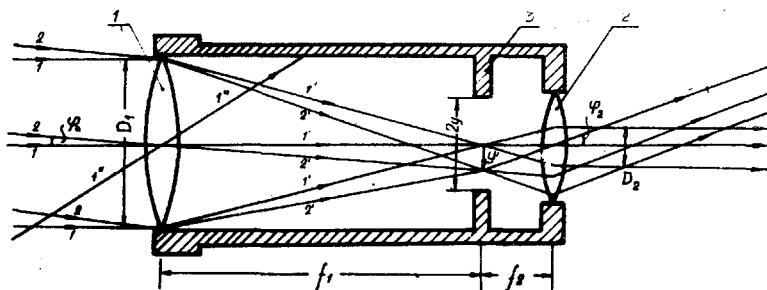


Рис. 4.1. Зрительная труба Кеплера.

1 - объектив, 2 - окуляр, 3 - диафрагма поля зрения.

объективом. С помощью окуляра это изображение будет видно увеличенным и перевернутым относительно объекта. В фокальную плоскость объектива, где находится изображение, можно поместить шкаду.

Чтобы избежать присутствия разного рода аберраций, в качестве окуляра и объекта используют не простые линзы, а сложные комбинации линз. Для наблюдения неперевернутых изображений в зрительной трубе Кеплера применяют дополнительные оптические системы, переворачивающие изображение; например, положительные линзы или комбинации призм.

4.3.2. Диафрагмы в зрительной трубе.

Как и в любой оптической системе, пучок лучей в зрительной трубе ограничен за счет конечной величины диаметров линз. Помимо этого в зрительной трубе могут и дополнительные отверстия ограничивать пучок лучей. Пучки лучей могут быть ограничены и за счет изображений всех этих отверстий. Действительные отверстия и их изображения находятся в сопряженных плоскостях, для которых справедливы уравнения сопряженных плоскостей линзы; на основании их можно вычислить местоположение и размеры диафрагмы. Подробнее о расчете диафрагм можно прочитать в [1], с. 89 - 96 и в [2], с. 318 - 324.

Рассмотрим случай, когда в зрительную трубу попадает параллельный пучок лучей. Обычно первой преградой на пути этого пуч-

ка будут края объектива ДД. В зрительную трубу попадают только те лучи, которые прошли объектив. Если пучок лучей не встречает на своем дальнейшем пути новых диафрагм, еще больше ограничивающих его, то объектив оказывается тем отверстием, которое определяет световой поток, прошедший зрительную трубу.

Отверстие диафрагмы или его изображение, которое в самой большой степени ограничивает входящий в зрительную трубу пучок лучей, называют входным отверстием.

Действительную диафрагму, изображение которой определяет входной зрачок, называют апертурной диафрагмой. В настоящих телескопических системах, как и в ранее рассмотренном случае, апертурной диафрагмой служат края объектива. Если поместить за объективом дополнительную диафрагму, то световой поток, прошедший через зрительную трубу, зависит не только от размеров диафрагмы, а также от местоположения ее на оптической оси. Например /см. рис. 4.2/, непосредственно за объективом помещенная диафрагма ДД задерживает большую часть света, прошедшего через объектив, а диафрагма, помещенная вблизи фокальной плоскости объектива ДД, пропускает весь световой поток прошедший через объектив.

Изображение входного зрачка, которое дает полная оптическая система зрительной трубы, называют выходным зрачком. Обычно выходной зрачок выбирают равным главному зрачку. Если диаметр зрачка глаза меньше выходного зрачка зрительной трубы /например, при очень сильном освещении, когда зрачок суживается/, то выходной пучок ограничивается в большей степени зрачком глаза. В таком случае входным зрачком зрительной трубы оказывается изображение зрачка глаза в пространстве изображения.

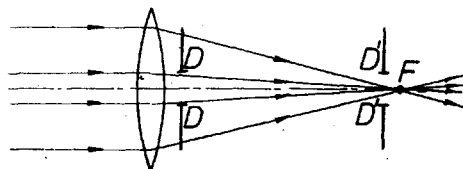


Рис. 4.2.

Апертурная диафрагма вместе с входными и выходными отверстиями зрительной трубы определяет сечение пучка лучей, прошедших

через зрительную трубу. Однако, не всякий параллельный пучок от далеко расположенного предмета проходит зрительную трубу целиком и, следовательно, не всегда можно получить его изображение. Например, лучи типа I" прошедшие зрительную трубу под углом φ на рис. 4.1. не дадут изображения. Говорят, что поле зрения оптической системы ограничено. Поле зрения называют ту часть пространства объектов, которую мы видим через зрительную трубу. Если между объективом и окуляром нет дополнительных препятствий, то и поле зрения не имеет резких границ. Яркость изображения уменьшается монотонно к краям поля зрения до нуля. Часть поля зрения с яркостью много меньшей, чем в центральной области, не имеет практического значения и обычно в зрительной трубе устраняется с помощью так называемой диафрагмы поля зрения /3 на рис. 4.1/.

Отверстие, которое из центра входного зрачка видно под наименьшим углом, называют люком. Действительная диафрагма, изображение которой есть люк и является диафрагмой поля зрения. Для резкого ограничения поля зрения необходимо, чтобы люк совпадал с плоскостью объекта. Следовательно, диафрагма поля зрения должна находиться в фокальной плоскости объектива зрительной трубы, поскольку сопряженная ей плоскость лежит в бесконечности. Поле зрения будет определяться диаметром $2y$ этой диафрагмы и фокусным расстоянием f_1 объектива. Угол зрения θ относительно оптической оси находится из формулы

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y}{f_1} \quad /4.1/$$

Угол 2θ - полный угол зрения.

Размеры поля зрения могут быть заданы или в угловых единицах, или в единицах длины в расчете на определенное расстояние /обычно 1000 м/.

4.3.3. Увеличение зрительной трубы.

Угол, под которым мы видим объект при наблюдении его с определенного расстояния, тем больше, чем больше линейные размеры объекта /рис. 4.3/. Зависимость между линейными размерами объекта и углом зрения линейна:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \varphi} \quad /4.2/$$

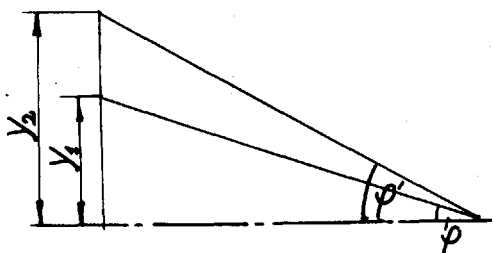


Рис. 4.3.

Поскольку связь /4.2/ справедлива и для любой телескопической системы, то угловым увеличением зрительной трубы можно считать отношение

$$\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1} \quad /4.3/$$

где γ - угловое увеличение зрительной трубы,
 φ_2 - угол, под которым виден объект в зрительную трубу,
 φ_1 - угол, под которым виден объект невооруженным глазом.

Пусть оптическая ось зрительной трубы направлена на один край рассматриваемого далекого объекта. Лучи, которые идут от другого края объекта, образуют с оптической осью угол φ_0 /рис. 4.1/. В фокальной плоскости объектива возникает изображение y' рассматриваемого объекта, которое одновременно находится в фокальной плоскости окуляра. Рассмотрим луч, идущий от края изображения y' и попадающий в оптический центр окуляра. При прохождении окуляра этот луч не изменяет направления - с оптической осью он составляет угол φ_2 . Остальные лучи распространяются после прохождения окуляра параллельно рассмотренному. Поскольку расстояние до объекта в сравнении с длиной зрительной трубы очень велико, можем считать углы, под которыми лучи от края объекта попадают в объектив и в глаз, равными. Из рисунка 4.1 видно, что

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{y'}{f_1}, \quad /4.4/$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{y'}{f_2}, \quad /4.5/$$

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{D_1}{D_2}, \quad /4.6/$$

где D_1 и D_2 соответственно диаметры входной и выходной зрелки.

Угловое увеличение теперь определится так:

$$\gamma = \frac{\lg \varphi_2}{\lg \varphi_1} = \frac{f_1}{f_2} \quad /4.7/$$

или из /4.6/

$$\gamma = \frac{D_1}{D_2}. \quad /4.8/$$

Можно показать, что между угловым и линейным увеличением в телескопической системе выполняется связь

$$\gamma\beta = 1, \quad /4.9/$$

где β - линейное увеличение.

4.3.4. Разрешающая способность зрительной трубы.

Разрешающая способность оптических систем, дающих изображение объекта, характеризует их способность давать два раздельных изображения двух близлежащих точек объекта.

Пусть лучи исходят из бесконечно удаленной точки. Если предположить, что объектив зрительной трубы свободен от аберраций, то в своем фокусе он должен дать изображение в виде точки. За счет дифракции на отверстии объектива в фокальной плоскости получается дифракционная картина - светлый центральный максимум и окружающие его темные и светлые кольца. Если лучи исходят из двух бесконечно далеко удаленных точечных источника, то, согласно условию Релея, границей их разрешимости считают такое их положение, когда центральный максимум дифракционной картины от одного источника попадает на первый минимум дифракционной картины от второго источника /рис. 4.4/. В таком случае, интенсивность на половине расстояния между центральными максимумами, составляет примерно 75 % от интенсивности максимумов. Такое отличие в интенсивностях глаз уже способен заметить.

Самое малое расстояние между еще различаемыми точками изображения, следовательно, равняется радиусу r , первого дифракционного кольца, который в фокальной плоскости объектива определяется формулой

$$r = 1,22\lambda \frac{f_1}{D},$$

где D_1 - диаметр входного зрачка,
 λ - длина волны света.

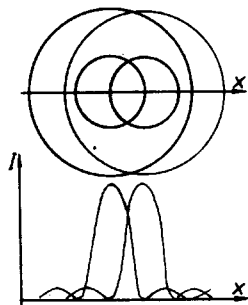


Рис. 4.4.

Дифракционная картина от двух точечных источников
 в фокальной плоскости объектива.

Угловое расстояние между еще различаемыми в объективе точками определяется следующим отношением:

$$\varphi = \frac{r_1}{f_1} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \text{ /рад/}. \quad /4.11/$$

Обратное значение этой величины называют разрешающей способностью A объектива

$$A = \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{1,22} \frac{D_1}{\lambda}. \quad /4.12/$$

Окуляр не влияет на разрешающую способность зрительной трубы. /Почему?/

4.3.5. Зрительная труба Галилея.

Кроме зрительной трубы Кеплера в практике используется и так называемая зрительная труба Галилея, оптическая схема которой приведена на рис. 4.5. Здесь объективом служит также положительная линза, но окуляром является отрицательная линза. Задний фокус объектива и передний фокус окуляра совпадают. В зрительную трубу Галилея наблюдается прямое изображение объекта. Все ска-

занное ранее применительно к зрительной трубе Кеплера справедливо и в этом случае.

О зрительной трубе Галилея подробнее сказано в [1], с. 106.

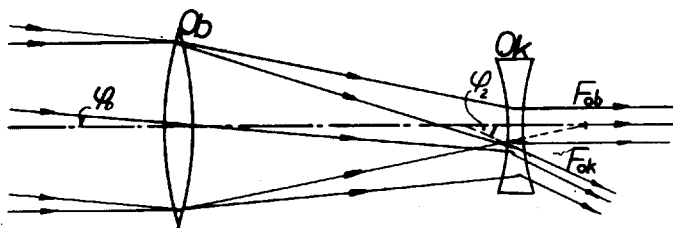


Рис. 4.5.
Зрительная труба Галилея.

4.4. Эксперимент

Для определения увеличения зрительной трубы направим ее на шкалу, закрепленную на стене. Фокусируем трубу до получения резкого изображения шкалы. Далее будем одним глазом наблюдать изображение шкалы в зрительную трубу, а другим глазом помимо трубы наблюдаем шкалу так, чтобы изображение и сама шкала казались видимыми рядом /см. рис. 4.6/. Определяем, сколько делений шкалы, видимой невооруженным глазом, приходится на одно или несколько делений изображения шкалы в зрительной трубе. Проще всего найти число делений изображения, приходящееся на полную шкалу, видимую невооруженным глазом.

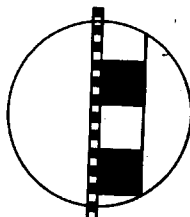


Рис. 4.6.
Определение увеличения зрительной трубы.

Число, прямо наблюдаемых делений шкалы, соответствующее одному делению изображения шкалы, видимого через зрительную тру-

бу, и есть увеличение трубы, поскольку в случае малых углов можно тангенсы заменить длинами дуг соответствующих углов /см. формулу 4.3/.

Второй метод определения увеличения зрительной трубы заключается в следующем. Сфокусируем зрительную трубу на бесконечность; после этого направим ее на ярко и равномерно освещенный объект, причем, нужно следить за тем, чтобы объектив был полностью заполнен светом. За окуляром зрительной трубы помещаем лист бумаги, на котором будет видно светлое пятно. Сменяя лист, можем на нем получить резкое изображение выходного зрачка, диаметр которого измеряем штангенциркулем. Измерив и диаметр объектива, являющегося входным зрачком, вычислим по формуле /4.8/ увеличение зрительной трубы.

Для определения поля зрения находим максимальную длину участка шкалы, который возможно наблюдать в зрительную трубу, и измерим расстояние δ от объектива до шкалы. Отношение $\frac{\alpha}{\delta}$ и есть величина поля зрения в радианах. Если умножить полученное отношение на 57,3, получим величину поля зрения в градусах.

Для определения разрешающей способности зрительной трубы сфокусируем ее на тест-таблицу "Мира". Последняя представляет собой отдельные клетки со штрихами /рис. 4.7/. В каждой клетке штрихи расположены на одинаковых расстояниях. Эти расстояния указаны на краях таблицы.

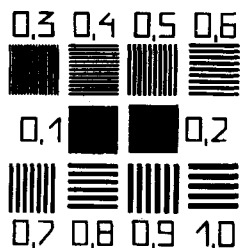


Рис. 4.7. Тест-таблица.

Разрешающую способность определим на основании формулы:
 $A = \frac{1}{\varphi}$. Предельный угол φ найдем из отношения $\varphi = \frac{x}{\alpha}$,
 где x — самое малое, еще различимое в зрительную трубу расстояние между штрихами и α — расстояние от объектива зритель-

ной трубы до тест-таблицы. Измерения для каждого отдельного расстояния между штрихами проводим по меньшей мере 2 раза. Величину входного отверстия регулируем с помощью диафрагмы, помещенной перед объективом. Диаметр D диафрагмы в миллиметрах обозначен на ее оправе.

На основании полученных данных нарисуем график зависимости A от D , сравним эти данные с вычисленными по формуле /4.12/ значениями.

Для всех измерений произведем оценку погрешностей измерения.

4.5. Вопросы

1. Сравните разрешающую способность глаза и зрительной трубы.
2. На сколько отличалась бы разрешающая способность зрительной трубы, если бы использовался белый свет?
3. Зависит ли разрешающая способность от увеличения?
4. Как зависит поле зрения зрительной трубы от ее увеличения?
5. Можно ли в зрительной трубе Галилея использовать окулярную шкалу?

4.6. Литература

1. Г.С. Ландсберг. Оптика - М.: Наука, 1976, §§ 70 - 92.
2. Д.В. Сивухин. Общий курс физики. Оптика - М.: Наука, 1980, § 24.

5. СРАВНЕНИЕ СИЛ СВЕТА ИСТОЧНИКОВ С ПОМОЩЬЮ ФОТОМЕТРА И ГРАДУИРОВКА ЛЮКСМЕТРА

5.1. Задание

Ознакомление с фотометрическими единицами измерения и устройством фотометров. Сравнение силы света исследуемого источника /лампа накаливания/ с силой нормального источника. Определение электрической мощности, приходящейся на одну канделу. Градуировка фотоэлемента и вычисление его чувствительности.

5.2. Принадлежности

Фотометр ФСМ, нормальная лампа, исследуемый источник света, амперметр, вольтметр, фотоэлемент, микроамперметр, магазин сопротивлений.

5.3. Элементы теории

Для успешного выполнения работы нужно предварительно усвоить основные понятия фотометрии /лучистый поток, световой поток, сила света, освещенность, светимость, яркость и т.д./, единицы измерения фотометрических величин и принципы работы фотометров /см. I, 2 /.

5.3.1. Фотометрические величины и единицы.

Светом называют электромагнитное излучение такого рода, которое вызывает световое ощущение /интервал длин волн от 380 до 760 нм/. Любое электромагнитное излучение, в том числе и световое, может быть измерено обычными физическими методами, используя единицы потока энергии. Под потоком энергии через некоторую поверхность понимается количество энергии, прошедшей через данную поверхность в единицу времени. В случае света вместо понятия потока энергии вводится аналогичное понятие - световой поток. Как и поток энергии, световой поток можно измерять в ваттах.

Зависимость восприятия любого регистрирующего свет устройства, в том числе и глаза, от длины волны характеризует спек-

тральную чувствительность. Для глаза мерой спектральной чувствительности $V(\lambda)$ является обратное значение мощностей монохроматического излучения разных длин волн, вызывающих одинаковое световое ощущение. Величину $K(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V(\lambda)_{\max}}$ называют относительной спектральной чувствительностью. Спектральная чувствительность глаза зависит от интенсивности света. При дневном нормальном зрении максимальная чувствительность глаза приходится на свет с длиной волны 556 нм. Мощность этого излучения в 1 ватт соответствует 683 лмменам. Таким образом, максимальная чувствительность нормального глаза составляет 683 лм/Вт. Для сумеречного света максимум чувствительности глаза смещается примерно на 50 нм в сторону коротких волн.

Световой поток излучения со сложным спектральным составом определяется интегралом:

$$\Phi = 683 \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) K(\lambda) d\lambda \quad (\text{лм}) \quad /5.1/$$

где $\varphi(\lambda)d\lambda$ является мощностью излучения в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, а 683 $K(\lambda)$ – спектральная чувствительность глаза. Световая излучательная способность источника определяется следующим отношением:

$$N_v = \frac{\Phi}{W} = \frac{683 \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) K(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda) d\lambda} \quad [\frac{\text{лм}}{\text{Вт}}], \quad /5.2/$$

где в числителе стоит полный световой поток в лмменах, в знаменателе – излучаемый источником поток энергии в ваттах.

Под силой света источника J понимается величина светового потока $d\Phi$, излучаемого точечным источником в единичном телесном угле $d\omega$

$$J = \frac{d\Phi}{d\omega}. \quad /5.3/$$

При известной силе света источника излучаемый световой поток выражается следующим образом:

$$\Phi = \int J d\omega \quad /5.4/$$

Если излучение изотропно в пределах телесного угла, тогда световой поток выражается так:

$$\varphi = J\omega \quad /5.5/$$

Источники, которые не являются точечными, описываются яркостью. Яркость B источника определяется по формуле

$$B = \frac{dJ}{dS \cdot \cos \alpha}, \quad /5.6/$$

где α - угол между направлением наблюдения и нормалью к поверхности, dJ - сила света, соответствующая элементу поверхности dS .

Освещенность E определяется отношением светового потока $d\varphi$ перпендикулярно падающего на поверхность, к площади поверхности dS , т.е.

$$E = \frac{d\varphi}{dS}. \quad /5.7/$$

Кроме названных величин в фотометрии используются еще ряд величин. Здесь отметим из них световую энергию Q и световую экспозицию H . Эти величины определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} Q &= \int \varphi dt \\ H &= \int E dt \end{aligned} \quad /5.8/$$

Соответственно международному соглашению основной величиной в фотометрии служит сила света источника, которая измеряется в канделах. Кандела - сила света, испускаемого с площади $1/600\,000\text{ м}^2$ абсолютно черного тела в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины $/2046\text{ К/}$ при давлении $101\,325\text{ Па}$.

Остальные фотометрические единицы выводятся из основной единицы кандела и являются следующими:

Фотометрическая величина	Единица	Обозначение	Размерность
Сила света	кандела	кд	
Световой поток	люмен	лм	кд·ср
Световая энергия	люмен-секунд	лм·с	кд·ср·с
Яркость	нит	нт	кд/м ²
Освещенность	люкс	лк	кд·ср/м ²
Световая экспозиция	люкс-секунд	лк·с	$\frac{\text{кд} \cdot \text{ср} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$

5.3.2. Фотометр.

Силы света источников сравниваются с помощью специальных приборов, т.н. фотометров, которые подразделяются на визуальные и физические. В последних для регистрации света используются физические приемники света: фотоячейки, фотоумножители, фотосопротивления, фотоэлементы, термоэлементы и т.д.

В визуальных фотометрах регистрирующим свет прибором является глаз. Непосредственно глазом нельзя измерять световые характеристики. Но глаз хорошо различает малые отличия в яркости отдельных частей поля зрения. Поэтому работа визуального фотометра основана на уравнивании освещенностей двух частей поля или получения равной контрастности. Фотометры первого типа называются фотометрами равного поля, здесь добиваются равной яркости двух сравниваемых полей зрения или исчезновения границы между ними. Этот момент называют фотометрическим равновесием. Часть фотометра, где производится сравнение полей, называется фотометрической головкой.

Получение хорошего фотометрического поля обеспечивает фотометрический куб /рис. 5.1, фотометр Диммера-Бродхуна/. Его задачей является установить два световых потока в поле зрения рядом. Фотометрический куб состоит из двух 90° призм сложенных по диагонали. Часть соприкасающихся поверхностей находится в оптическом контакте, часть же полностью отражает свет. В этих частях поверхности одной призмы срезаны.

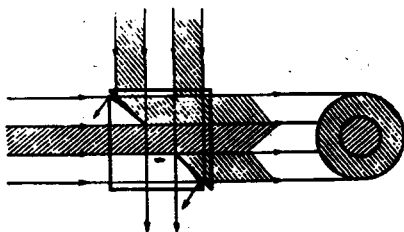


Рис. 5.1. Фотометрический куб.

Фотометрическая головка устанавливается между сравнимыми источниками света L_1 и L_2 /см. рис. 5.2/. Свет через отверстия a_1 и a_2 попадает на белый экран E /меловая или из алебастрового гипса пластинка/, где он рассеивается во всех направлениях. Часть света поступившего справа попадает на зеркало S_1 и оттуда на фотометрический куб. В области оптического контакта свет проходит насквозь, там же, где контакт отсутствует, свет отражается в окуляр. Слева поступивший свет также рассеивается на экране, часть его попадает на зеркало S_2 и оттуда на другую грань куба. В области оптического контакта свет проходит через куб в окуляр. Остальная часть света отражается. В окуляре, сфокусированном на поверхность оптического контакта, можно наблюдать поле зрения, определенное строением куба.

При измерениях фотометр устанавливается в положение фотометрического равновесия, т.е. освещенности /а также яркости/ обеих сторон пластины одинаковы. Если источники света являются точечными, тогда освещенность выражается:

$$E = \frac{J \cdot \cos \alpha}{R^2}, \quad /5.9/$$

где R - расстояние от источника до экрана, J - сила света источника и α - угол падения лучей на экран /у нас $\alpha \approx 90^\circ$ /. В случае фотометрического равновесия

$$E_1 = E_2, \quad /5.10/$$

где E_1 и E_2 - освещенности обеих сторон пластины.
Следовательно

$$\frac{J_1}{R_1^2} = \frac{J_2}{R_2^2} . \quad /5.11/$$

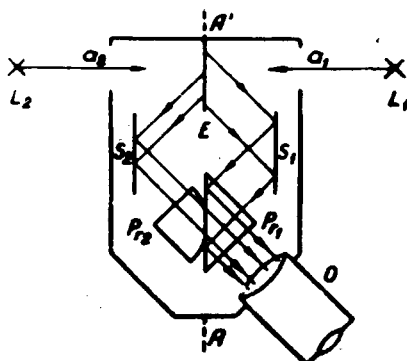


Рис. 5.2. Схема фотометра Льюммера-Бродхуна.

Если мы знаем величину силы света одного источника и измеряем расстояния R_1 и R_2 , то из формулы /5.11/ можно найти величину силы света второго источника.

Фотометр Льюммера-Бродхуна должен быть симметричным. Несимметричность /например, стороны экрана отражают неодинаково/ корректируется двумя измерениями: первое - при произвольном направлении головки фотометра, а второе - при повороте ее на 180° вокруг оси AA' . Из сделанных измерений находится среднее арифметическое.

Для достижения фотометрического равновесия при сравнении силы света источников можно использовать ряд методов. Среди них самый простой - изменение расстояния между источниками и приемной пластиной. Но отношение расстояний можно изменять в относительно узких пределах, поэтому часто приходится использовать и другие способы ослабления светового потока, например, при помощи нейтральных поглощающих фильтров, поляроидов или вращающихся

дисков с различными секторными вырезами /вращающийся поглотитель/.

5.3.3. Описание фотометрической скамьи ФСМ.

Фотометрическая скамья состоит из следующих основных частей: оптической скамьи /1/, передвижных кареток /2/, фотометрической головки /4/, измерителя расстояния /5/, вращающегося поглотителя /3/ и держателя источников света /6/ /См. рис. 5.3/.

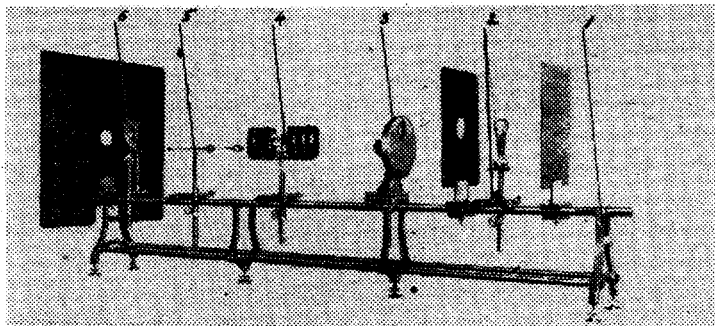


Рис. 5.3. Общий вид фотометрической скамьи ФСМ.

На передвижные каретки помещают устройства или детали, местоположение которых на оптической скамье надо менять. Снизу на плите каретки укреплен штриховой индекс для отсчета по шкале скамьи. Каретку можно перемещать вдоль оптической скамьи вращением специальной рукоятки и закрепить в нужном положении рукояткой тормоза.

Фотометрическую головку помещают между двумя источниками света. Ее оптическая схема такая же, какая приведена на рис. 5.2.

Для фотометрических измерений все необходимые части /источники света, приемный экран и т.д./ следует поместить на оптическую ось скамьи. Сперва помещают на место вращающийся поглотитель и фотометрическую головку, затем регулируют высоту последней равной высоте отверстия поглотителя. Источники света закрепляются на концах оптической скамьи /почему именно туда?/. Затем вынимают приемную пластину из корпуса головки, нажимая пальцами на щетку замка оправы, и ставят осторожно на стол. Сквозное отверстие в корпусе головки закрывают с обеих сторон

визирными сетками и включают лампы.

Теперь следует регулировать положение одной лампы таким образом, чтобы визирная сетка, которая расположена ближе к источнику света, спроецировалась точно на другую. Таким образом поступают и с другой лампой. Держатель источника света позволяет помещать лампу в нужное положение. Держатель можно перемещать в трех независимых направлениях: смещать перпендикулярно оси оптической скамьи и наклонять в двух плоскостях. Держатель помещается на каретке, где его можно смещать вверх-вниз.

Во время измерений визирные сетки отодвигают в сторону и возвращают на свое место приемную пластину. По обе стороны головки фотометра устанавливают черные бархатные экраны, чтобы исключить попадание в фотометр постороннего света.

Точность определения силы света источника зависит сильно от точности измерения расстояний. Поскольку в расчеты величины расстояний входят в квадрате—относительная ошибка освещенности пропорциональна удвоенной ошибке расстояния.

На оптической скамье приходится измерять расстояния между разными деталями, например, между нитью накала лампы и приемной пластиной. При измерениях же непосредственно можно регистрировать только местоположение кареток по шкале. В большинстве случаев перпендикулярная оптической скамье плоскость, в которой находится деталь /например, нить накала лампы/, не совпадает с параллельной ей плоскостью, проходящей через индекс каретки. Поэтому разность показаний индексов кареток не отображает величины расстояния между помещенными на них деталями. Для точных измерений расстояний используется специальный измеритель расстояний.

Измеритель расстояний представляет собой длинный стержень, на одном конце которого укреплен металлическая дуга. Стержень укреплен в штативе и его можно закреплять на каретке. Стержень расположен параллельно оси скамьи. На каждом из концов дуги укреплены держатели визирных сеток.

Плоскость, проходящая через вертикальные линии сетки, перпендикулярна оптической скамье. Расстояние от этой плоскости до другого конца стержня $/L_0/$ дано в паспорте. Для измерения расстояний между деталями, помещенными на каретках, один из объектов, например, лампа накаливания, устанавливается так, чтобы плоскость,

проходящая через лампы, совпадала с плоскостью, проходящей через визирные кресты нитей. С другой стороны приводится в соприкосновение с концом стержня другой объект /приемная пластина/. В этом случае расстояние между объектами равно L_0 . Пусть отсчеты, снятые при этом со шкалы скамьи по индексам кареток, составляют n'_1 и n'_2 /рис. 5.4/.

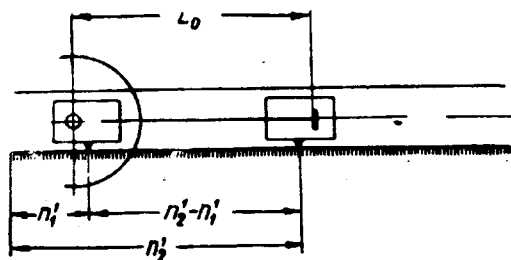


Рис. 5.4. Схема использования измерителя расстояний.

Предполагаем, что $n'_2 > n'_1$. Действительное расстояние между деталями может отличаться от $n'_2 - n'_1$ на некоторую положительную или отрицательную величину Δ .

$$\Delta = L_0 - (n'_2 - n'_1) \quad /5.12/$$

При дальнейших измерениях приходится смещать каретки вдоль скамьи. Пусть соответствующие отсчеты будут n_1 и n_2 . Предполагая, что $n_2 > n_1$, легко найти действительное расстояние между объектами:

$$R = (n_2 - n_1) + \Delta \quad /5.13/$$

На опыте удобно, оставляя неподвижными источники света в определенном положении, менять местоположение фотометрической головки до получения положения равновесия.

Если интенсивности сравниваемых источников сильно различаются, приходится пользоваться вращающимся поглотителем. После включения мотора поглотителя нужно отрегулировать при помощи реостата скорость вращения поглотителя таким образом, чтобы глаз не

замечал миганий света. Коэффициент ослабления зависит от размеров вырезанного сектора и он дается в паспорте поглотителя.

Определение силы света источника происходит следующим образом /см. рис. 5.5/. Сравнимые источники с силами света J и J_0 находятся на концах оптической скамьи. Фотометрическое равновесие достигается смещением фотометрической головки по оптической скамье. Определяются расстояния от источников до приемной пластины R и R_0 . Для фотометрического равновесия выполняется формула

$$\frac{J}{J_0} = \frac{R^2}{R_0^2} \quad /5.14/$$

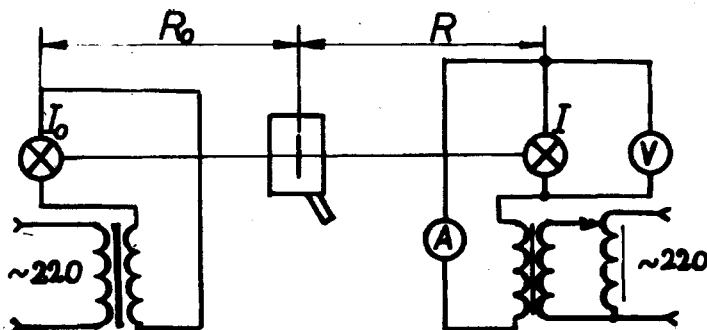


Рис. 5.5. Определение силы света источника.

Поскольку пластина может иметь не совсем одинаковый коэффициент отражения для разных сторон, а также могут отличаться потери света при прохождении через оптическую систему по разным путям, то следует повторять каждое измерение при повернутой на 180° фотометрической головке. Фотометрическую головку можно повернуть, убирая фиксатор на задней стороне головки.

Сила света вычисляется тогда по формуле

$$\frac{J}{J_0} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_{01} \cdot R_{02}}, \quad /5.15/$$

где R_1 и R_{01} - расстояния до источников в одном положении фотометра, R_2 и R_{02} - на 180° повернутом фотометре.

Если используется поглотитель, тогда формула приобретает вид:

$$\frac{J}{k\beta_0} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_{01} \cdot R_{02}}, \quad /5.16/$$

где k — коэффициент ослабления, равный отношению проходящего светового потока к падающему на поглотитель потоку.

5.3.4. Фотоэлемент.

Ниже дается краткое качественное объяснение принципа работы фотоэлемента. Фотоэлемент является полупроводниковой системой, в которой $p-n$ — переход находится почти на поверхности элемента. Электроны, генерируемые вследствие внутреннего фотоэффекта в поверхностном слое p — полупроводник/ проходят беспрепятственно запирающий слой в прямом направлении. Дырки, генерируемые в том же слое, не могут пройти через запирающий слой, так как запирающий слой представляет собой для них потенциальный барьер.

В случае замкнутой цепи генерируемые светом электроны проходят внешнюю цепь и подключенный к фотоэлементу микроамперметр покажет ток. Возникающее во внешней цепи напряжение подключается к самому фотоэлементу и уменьшает в некоторой мере потенциальный барьер. Если сопротивление этой внешней цепи мало, то величина потенциального барьера остается практически неизменной, и все генерируемые электроны пройдут внешнюю цепь. В таком случае фототок будет пропорциональным освещенности в большом диапазоне значений освещенностей. Если же сопротивление цепи по порядку величины равно сопротивлению запирающего слоя в обратном направлении, то при увеличении освещенности потенциальный барьер существенно уменьшается. Вследствие этого часть электронов и дырок проходит запирающий слой и в обратном направлении и, проходящий через внешнюю цепь фототок, уже нелинейно зависит от освещенности.

5.3.5. Эксперимент.

А. Вначале определяем зависимость силы света источника от напряжения. Для изменения напряжения используется автотрансформатор. Потребляемая лампой мощность:

$$N = iU, \quad /5.17/$$

где i — сила тока, проходящего через лампу, а U — напряжение на лампе. Измерения производим при 7 — 8 различных напря-

жениях. Самое большое напряжение может превышать номинальное напряжение лампы на 5 %. Каждый раз измеряем напряжение U , силу тока i и расстояния лампы накаливания и нормальной лампы до приемной пластины при фотометрическом равновесии. При каждом напряжении нужно провести не менее 3-х измерений в одном положении фотометрической головки, и 3 измерения в повернутом на 180° положении. Из полученных данных вычисляем силу света источника и мощность тока в ваттах, приходящуюся на одну канделу при всех напряжениях. Данные приводим в таблицу 5.1.

$$\Delta_1 = \dots \quad \Delta_2 = \dots$$

Сила света нормальной лампы $J_0 = \dots$

Коэффициент ослабления поглотителя $k = \dots$

Положение нормальной лампы \dots

Положение исследуемого источника \dots

Таблица 5.1

№	Напряжение U	Сила тока i	Положение карет- ки фотометра		Расстояние от фото- метра до ламп			
				n'_1 n'_2	R_1	R_2	R_{01}	R_{02}
I			1.					
			2.					
			3.					
2								
3								
⋮								
⋮								

По полученным данным вычисляем средние значения $R_1, R_2, R_{01}, R_{02}, J_1, iU, \frac{N}{J_1}$, которые приводим в таблице 5.2. По этим данным строим графики зависимости $N/J_1 = f(U)$ и $N/J_1 = f(N)$.

Таблица 5.2

№	R_1	R_2	R_{01}	R_{02}	$J_1 = k J_0 \frac{R_1 \cdot R_2}{R_{01} \cdot R_{02}}$	$N = iU$	N/J_1
1							
2							
3							
⋮							
⋮							

Б. Теперь мы знаем величину силы света исследуемого источника при различных напряжениях /в том числе и при номинальном напряжении/ и мы можем приступить к градуировке люксметра. Люксметром называется фотоэлемент, для которого известна зависимость фототока от освещенности на его поверхности. Градуируемый фотоэлемент находится на другой оптической скамье, где источником света является идентичная изучаемой лампе лампочка, с такой же силой света. Для накаливания лампы используется номинальное напряжение. Напряжение измеряется на цоколе лампы вольтметром. Соответствующую силу света находят из первой части работы. Расстояние между фотоэлементом и лампой можно изменить, передвигая лампу на оптической скамье. Для определения расстояния R между лампой и фотоэлементом нужно пользоваться дальномером. С изменением расстояния лампы от фотоэлемента изменяется и освещенность фотоэлемента. Освещенность E вычисляется по формуле

$$E = \frac{J_s}{R^2}, \quad /5.18/$$

где J_s - сила света источника при данном напряжении.

Для измерений собираем схему, представленную на рис. 5.6.

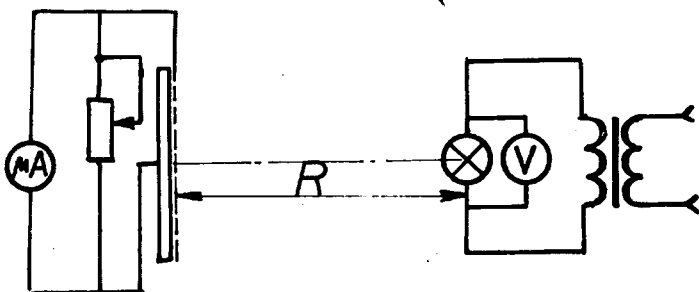


Рис. 5.6. Схема калибровки фотоэлемента на люксметр.

В начале измерений установим на магазине небольшое сопротивление $/\approx 100 \Omega/$. Лампу придвигаем к фотоэлементу на такое расстояние, на которое позволяет установка. Сопротивление магазина подбирается так, чтобы микроамперметр показывал максимальное отклонение. Записываем в протокол соответствующие этому положению показания указателей реостатов, фотоэлемента и лампы \mathcal{P}_ϕ и \mathcal{P}_λ , а

также фототок j . Меняя расстояние от источника до фотоэлемента, регистрируем n_{ϕ} и n_{λ} , которые соответствуют интервалам фототока $1 \mu A$. На больших расстояниях, когда фототок будет небольшим, фиксируем точки почаще. Измерения повторяем два раза - приближая и удаляя лампу.

По измеренным n_{ϕ} и n_{λ} вычисляем расстояния R и затем по формуле /5.18/ освещенность. Результаты запишем в таблицу 5.3.

Таблица 5.3.

№	n_{ϕ}	n_{λ}	R	R^2	$E = \frac{J_1}{R^2}$	$j (\mu A)$
1						
2						
3						
...						
...						

По полученным данным изобразим графически зависимость фототока от освещенности. Вычислим чувствительность фотоэлемента в А/лк для прямолинейного участка графика.

Зная, что удельная мощность (N/J_1) зависит от напряжения, найдем самый экономичный режим для накаливания лампы.

5.4. Вопросы

1. Что называется спектральной чувствительностью приемника света?
2. Объяснить, как работает вращающийся поглотитель. Отчего и каким образом зависит коэффициент ослабления поглотителя?
3. Объяснить строение и принцип работы фотометра Лиммера-Броджуна.
4. Какой источник света является точечным?
5. Зависит ли фотоэлектродвижущая сила от длины волны света?

6. Какая должна быть спектральная чувствительность фотоприемника, используемого в люксметре?

7. Почему в люксметре нужна диафрагма?

5.5. Литература

1. Г.С. Ландсберг. Оптика - М.: Наука, 1976, §§ 7 - 10.
2. И.В. Савельев. Курс общей физики, т. III - М.: Наука, 1978, §§ 5 - 7.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ РАСТВОРОВ И ПРОВЕРКА ЗАКОНА БЭРА

6.1. Задание

Знакомство с основами абсорбционной фотометрии. Изучение спектра поглощения и проверка закона Бэра.

6.2. Принадлежности

Фотоэлектрический фотометр, исследуемый и эталонный объекты, фотометр ФМ-56 для визуального наблюдения, комплект растворов с известными концентрациями, кюветы.

6.3. Элементы теории

Для выполнения настоящей работы необходимо знать закон поглощения света, закон Бэра, устройство и правила эксплуатации монохроматора / 1, 2 /.

Фотоэлектрический фотометр используется для исследования спектра поглощения, закон Бэра проверяется с помощью фотометра ФМ-56.

6.3.1. Фотоэлектрический фотометр.

Блок-схема фотоэлектрического фотометра приведена на рис. 6.1.

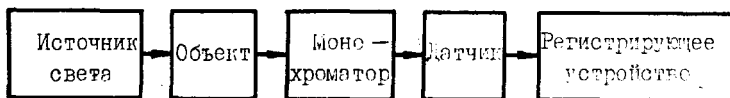


Рис. 6.1. Блок-схема фотоэлектрического фотометра.

В данном фотометре датчиком, реагирующим на свет, является фоторезистор. Проводимость фоторезистора зависит как от прило-

женного к нему напряжения, так и от величины падающего на него светового потока. Если напряжение остается постоянным /как в нашей работе/, то в малом спектральном интервале, сила фототока $i(\lambda)$ будет прямо пропорциональна интенсивности потока $\Phi(\lambda)$:

$$i(\lambda) = \alpha(\lambda) \Phi(\lambda), \quad /6.1/$$

здесь $\alpha(\lambda)$ - спектральная чувствительность фоторезистора. В нашем случае поток, падающий на фоторезистор, будет связан со значением потока $\Phi_0(\lambda)$, падающего на объект, следующим образом:

$$\Phi(\lambda) = (1-R) \gamma(\lambda) \tau(\lambda) \Phi_0(\lambda), \quad /6.2/$$

где R - коэффициент отражения света,
 $\gamma(\lambda)$ - пропускательность монохроматора,
 $\tau(\lambda)$ - пропускательность объекта.

Подставляя в формулу /6.1/ выражение для $\Phi(\lambda)$ из /6.2/, получим

$$i(\lambda) = \alpha(\lambda)(1-R) \gamma(\lambda) \tau(\lambda) \Phi_0(\lambda). \quad /6.3/$$

Для того, чтобы найти пропускательность объекта из /6.3/, надо исключить из этого выражения коэффициент отражения R . Для этого надо найти величину силы фототока $i_r(\lambda)$, который возникает под действием того же потока $\Phi_0(\lambda)$ при прохождении его через объект с пропускательностью равной единице /т.е. $\tau_r(\lambda) = 1$ /. Предполагая, что потери на отражение остаются такими же, как в случае исследуемого объекта, получаем для фототока следующее выражение

$$i_r(\lambda) = \alpha(\lambda)(1-R) \gamma(\lambda) \Phi_0(\lambda). \quad /6.4/$$

Из /6.3/ и /6.4/ следует, что

$$\tau(\lambda) = \frac{i(\lambda)}{i_r(\lambda)}. \quad /6.5/$$

Пропускаемость по определению есть $\tau(\lambda) = \frac{\varphi(\lambda)}{\varphi_0(\lambda)}$. /6.6/

Из закона поглощения света следует

$$\tau(\lambda) = \frac{\varphi(\lambda)}{\varphi_0(\lambda)} = e^{-K(\lambda)l}, \quad /6.7/$$

где $K(\lambda)$ - коэффициент поглощения*,
 l - толщина поглощающего слоя.

Из формул /6.5/ и /6.7/ легко найти $K(\lambda) = \frac{e_n \frac{i(\lambda)}{i_0(\lambda)}}{l}$. /6.8/

Определив значения $K(\lambda)$ при различных длинах волн, найдем спектр поглощения вещества.

6.3.2. Визуальный фотометр.

Для проверки закона Бера используется фотометр ФМ-56, оптическая схема которого приведена на рис. 6.2.

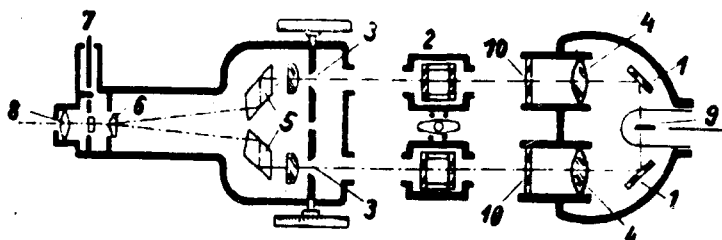


Рис. 6.2. Оптическая схема фотометра ФМ-56.

1 - зеркала, 2 - столик для кювет с растворами, 3 - диафрагмы с изменяемым отверстием, 4 - конденсоры, 5 - стеклянные ромбы, изменяющие направление лучей, 6 - бипризма, 7 - сменный фильтр, 8 - окуляр, 9 - лампа, 10 - матовые стекла.

Работа визуального фотометра основана на сравнении двух световых потоков. Световые потоки уравниваются с помощью диафрагм

* Часто в этом законе используется коэффициент экстинкции, который учитывает и рассеяние света в среде. Поскольку в нашей работе рассеяние света объектом мало, будем в дальнейшем пользоваться только понятием коэффициента поглощения.

с точно регулируемы́ми отверстия́ми. Диафрагмы снабжены шкалой. Два пучка света от осветителя после прохождения диафрагм собираются вместе за счет стеклянных ромбов 5 и попадают на бипризму 6. Наблюдатель видит в окуляр два поля с резкой границей раздела, левое поле освещено пучком, прошедшим через правое окно фотометра, правое поле - пучком, прошедшим через левое окно. Яркость обоих полей в общем случае неодинакова. Изменяя величину отверстия каждой диафрагмы, можно изменять яркость соответствующих полей. Если при одинаковой яркости обоих полей в один из пучков ввести поглощающий свет объект, то яркость соответствующего поля уменьшается. Чтобы уравнивать яркости, необходимо уменьшать отверстие диафрагмы для другого пучка.

На измерительные барабаны нанесены две шкалы - черная и красная. Черная шкала /0 - 100 делений/ показывает отношение площади отверстия диафрагмы в процентах. При равномерной плотности световых потоков отношение площадей отверстий диафрагм равно отношению соответствующих потоков. Следовательно, показания черной шкалы дают непосредственно величину пропускания τ объекта в процентах.

Красная шкала барабана соответствует оптической плотности D . Поскольку пропускание и оптическая плотность связаны между собой соотношением

$$D = -\lg \tau, \quad /6.9/$$

то шкала имеет деления от 0 до ∞ . Если определена оптическая плотность D , не трудно найти и коэффициент поглощения K , поскольку

$$K = \frac{D}{\ell}, \quad /6.10/$$

где ℓ - толщина поглощающего слоя.

Если поглощение света происходит в растворе, то коэффициент поглощения часто прямо пропорционален концентрации растворенного /поглощающего/ вещества /закон Бера/. Для проверки этого закона нужно найти коэффициенты поглощения растворов с разной концентрацией C и построить график $K = f(C)$.

6.4. Эксперимент

6.4.1. Определение спектра поглощения.

Схема установки, используемой в работе, дана на рис. 6.3. Свет от лампочки накаливания S собирается линзой L на входной щели монохроматора M . Свет узкого спектрального интервала, выделяемого монохроматором, попадает на фоторезистор FT . Напряжение на фоторезистор подается от источника E . Величину фототока измеряют микроамперметром. На штативе перед щелью монохроматора помещается рамка с исследуемым объектом F_1 /фильтр ПС-7/ и эталонным объектом F_2 /фильтр БС-8/* . Рамка может перемещаться в горизонтальном направлении.

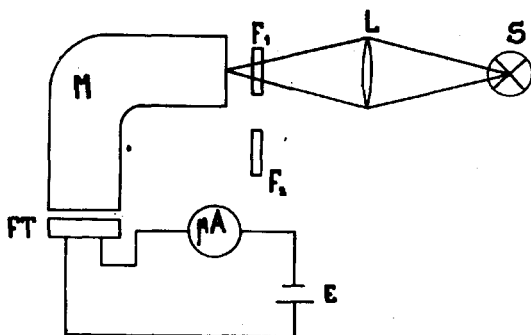


Рис. 6.3. Схема установки для определения спектра поглощения света.

До начала измерений нужно установить источник света и конденсорную линзу точно на оптическую ось монохроматора. Это выполняем согласно работе "Юстировка оптических приборов". На время юстировки фоторезистор убираем прочь, а потом вновь устанавливаем за выходной щелью монохроматора и соединяем его с источником напряжения и микроамперметром.

* Фильтр ПС-7 на практике используется для градуирования спектральных приборов. Пропускаемость фильтра БС-8 в видимой области спектра составляет $\tau = 0,998 - 1,000$.

Для определения спектра поглощения устанавливаем на микроамперметре максимальный предел измерений и ширину входной и выходной щелей равными 0,05 мм. При такой ширине щели выделяется из спектра интервал с шириной 0,5 – 1,0 нм. Помещаем перед входной щелью изучаемый объект – /фильтр ПС-7/ и открываем задвижку монохроматора. Брашая барабан, проверяем, достаточно ли велико отклонение стрелки микроамперметра на всем протяжении спектра. * /Используем график градуировки монохроматора./ В случае необходимости перейдем к меньшему пределу шкалы микроамперметра. Если и в случае наименьшего предела шкалы отклонения будут меньше, чем на половину шкалы, увеличиваем ширину входной щели.

Измеряем силу фототока в области спектра 400 – 750 нм через каждые 10 – 20 нм, уделяя внимание точному выявлению максимумов и минимумов. Измерения проводим дважды.

Помещаем перед щелью эталонный объект и вновь проверяем являются ли достаточной чувствительность регистрирующей системы на всем протяжении спектра. Измеряем силу фототока для тех же самых длин волн, что и было сделано для исследуемого объекта. На основании формулы /6.8/ вычисляем для каждой длины волны коэффициент поглощения.

Полученные данные удобно привести в следующей таблице /таблица 6.1/.

Таблица 6.1.

Показание барабана монохроматора	Объект сравнения		Исследуемый объект		K' /см ⁻¹ /	K'' /см ⁻¹ /	\bar{K} /см ⁻¹ /	λ /нм/
	Z' /мкА/	Z'' /мкА/	Z' /мкА/	Z'' /мкА/				

Строим график зависимости $\bar{K} = f(\lambda)$, где $\bar{K} = \frac{K' + K''}{2}$ и в крайних точках графика определяем погрешность измерения.

* В процессе измерений возможно придется изменить предел шкалы микроамперметра. Эта необходимость может возникнуть в коротковолновой области спектра.

6.4.2. Проверка закона Бара.

Общий вид используемого фотометра ФМ-56 приведен на рис. 6.4. Перед началом измерений фотометр надо подготовить для работы. Для этого необходимо осуществить следующие операции.

1/ Вилку осветителя поместим в гнезда трансформатора 0 и 8. К гнездам 4 и 16 подключаем осветители шкалы.

2/ На пути света помещаем зеленый фильтр /№ 5/, и окуляр фокусируем на линию разделения полей зрения. На обоих полях зрения должна быть резко видна нить лампы осветителя /см. 6.5а/.

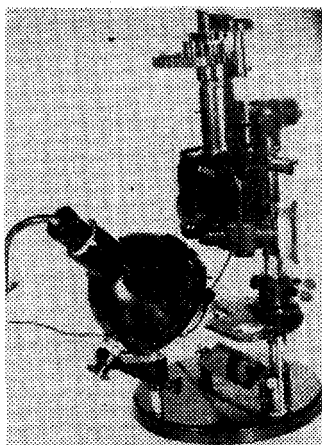


Рис. 6.4. Общий вид фотометра.

1 - фотометрическая головка, 2 - осветитель, 3 - столик, 4 - зеркало, 5 - конденсор, 6 - барабан, 7 - лупа, 8 - держатель фильтров.

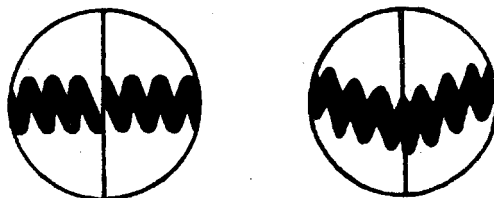


Рис. 6.5. Поле зрения без матового стекла перед осветителем.

Если это не так, то этого надо добиться вращением зеркала /4/ или смещением конденсорной линзы, или смещением лампы осветителя. Удовлетворительным считается и положение, приведенное на рис. 6.5б.

3/ Помещаем в щели конденсоров матовые стекла и устанавливаем на обоих барабанах одинаковые показания /например 50 и 50 на черной шкале/. Теперь должны быть оба поля освещены одинаково и равномерно. Если это не так, протравливаем следующее:

- а/ смещаем осторожно один /или оба/ конденсор, расфокусируя слегка изображение нити лампы;
- б/ изменяем положение матовых стекол;
- в/ помещаем перед одним из конденсоров кроме матового стекла еще и прозрачное стекло.

Регулировку можно считать законченной, если при равной освещенности полей, показания барабанов отличаются не больше, чем на $\pm 0,5$ деления /по черной шкале/. Теперь можем приступить к измерениям.

В данной работе исследуются растворы $LiSO_4$ разной концентрации в воде. Заметное поглощения света в этих растворах происходит при длинах волн больших 500 нм. Поэтому используем для измерений фильтры № 5, № 4, № 3 или № 2 /эффективные длины волн соответственно 533, 574, 619 и 665 нм/. Для измерений исследуемый объект /квету определенной длины с раствором/ помещаем в правый пучок света, в левый пучок помещаем такую же квету с водой. Правый барабан устанавливаем на нуль /по красной шкале/. Вращением левого барабана уравниваем яркости полей и снимаем затем отсчет D_A . Измерения повторяем 3 - 4 раза.

Меняем кветы местами и повторяем измерения, причем левый барабан устанавливаем на нулевое показание, а отсчет снимаем с правого барабана D_n .

Искомую оптическую плотность находим как

$$D = \frac{1}{2} (\bar{D}_A + \bar{D}_n) \quad /6.11/$$

Все измерения проводим по меньшей мере для четырех растворов с различными концентрациями. Данные заносим в таблицу /см. табл. 6.2/. По формуле /6.10/ находим значения коэффициентов поглощения.

$\ell = \dots$ см, фильтр № \dots

Таблица 6.2

Концентрация раствора C	$D_{\lambda 1}$	$D_{\lambda 2}$	$D_{\lambda 3}$	\bar{D}_{λ}	$D_{\eta 1}$	$D_{\eta 2}$	$D_{\eta 3}$	\bar{D}_{η}	D	$K (\text{см}^{-1})$

Построим график зависимости $K = f(C)$, оценим ошибку измерений и сделаем заключение о выполнении закона Бэра.

6.4. Вопросы

1. Приведите связь между оптической плотностью, коэффициентом поглощения и пропусканием.
2. Как устраняется при измерении коэффициента поглощения влияние отражения света?
3. Почему при измерениях с фотометром ФМ-56 в один пучок вводятся кювета с растворителем?
4. При каких условиях выполняется закон Бэра?
5. Объясните принцип работы фоторезистора.

6.5. Литература

1. С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. Курс общей физики, т. III - М.: Наука, 1961, § 276.
2. Г.С. Ландсберг. Оптика - М.: Наука, 1976, § 157.

ПРАКТИКУМ ПО ОПТИКЕ IV.
Составитель Хенн В о о л а й д.
На русском языке.
Тартуский государственный университет.
СССР, 202400, г.Тарту, ул.Някооли, 18.
Ответственный редактор Л. Лаан.
Корректор Г. Березенкова.
Подписано к печати 7.12.1983.
Формат 60x84/16.
Бумага ротаторная.
Машинопись. Ротапринт.
Условно-печатных листов 4,19.
Учетно-издательских листов 3,59. Печатных листов 4,5.
Тираж 400.
Заказ № 1317.
Цена 10 коп.
Типография ТГУ, СССР, 202400, г.Тарту, ул.Някооли, 14.